EL DESCUBRIMIENTO DEL UNIVERSO

NOTA SOBRE EL SISTEMA DE UNIDADES

En este libro, vamos a utilizar el año luz como unidad de medida de las distancias cósmicas. El año luz es la distancia recorrida en un año por la luz. Siendo la velocidad de la luz 300 000 kilómetros por segundo, el año luz resulta ser aproximadamente nueve millones de millones de kilómetros. En física, la temperatura suele medirse en grados Kelvin; el cero de la escala Kelvin corresponde al cero absoluto, igual a unos 273 grados Celsius (la escala utilizada comúnmente) *bajo cero.* Para pasar de la escala Kelvin a la Celsius, simplemente se resta 273 (por supuesto, para temperaturas de más de 10 000 grados, la resta es irrelevante).

Como en física y astronomía abundan los números extremadamente grandes y pequeños, utilizaremos la notación exponencial: $\mathbf{10^{n}}$ significa un 1 seguido de ***n*** ceros, y $\mathbf{10^{-n}}$ significa 0. seguido de ***n*-1** ceros. Por ejemplo, la masa del Sol es aproximadamente **2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000** kilogramos o sea: $\mathbf{2 \times 10^{30}}$ kilogramos; y la masa de un electrón es aproximadamente **0.0 000 000 000 000 000 000 000 000 009** gramos o sea: $\mathbf{9 \times 10^{-28}}$ gramos.

I. INICIOS DE LA COSMOLOGÍA Y LA COSMOGONÍA

¿QUÉ es el Universo? ¿Tuvo principio y tendrá fin? ¿Dónde están las fronteras del Universo y qué hay más allá de ellas? Estas preguntas, que se ramifican interminablemente, aparentemente se escapan de todo conocimiento y son inaccesibles a la razón; y, sin embargo, los hombres trataron de responderlas desde que empezaron a razonar: así lo atestiguan los mitos y leyendas sobre el origen del mundo que todos los pueblos primitivos elaboraron. En nuestra época de descubrimientos espectaculares, hemos aceptado la idea de que la Tierra es sólo un punto perdido en la inmensidad del Universo; pero las verdaderas dimensiones cósmicas se descubrieron hace sólo medio siglo, apenas ayer en comparación con la historia humana. Para muchos pueblos de la Antigüedad, la Tierra no se extendía mucho más allá de las regiones en que habitaban, y el cielo, con sus astros, parecía encontrarse apenas encima de las nubes. Tampoco tenían algún indicio de la edad del mundo y sólo podían afirmar que se formó algunos cientos, quizás miles de años atrás, en épocas de las que ya no guardaban memoria.

Desde el concepto de la Tierra, creada para morada del hombre, a la visión moderna del Universo, escenario de fenómenos de magnitudes inconcebibles, la cosmología tuvo que recorrer un largo y accidentado camino, para adquirir, finalmente, el carácter de ciencia. La cosmología moderna, estudio de las propiedades físicas del Universo, nació de la revolución científica del siglo XX.

COSMOGONÍAS Y COSMOLOGÍAS DE LA ANTIGÜEDAD

El mito babilónico de la creación es el más antiguo que ha llegado a nuestros días. El *Enuma elis* (Cuando arriba), escrito, quince siglos antes de la era cristiana, relata el nacimiento del mundo a partir de un caos primordial. En el principio, cuenta el mito, estaban mezcladas el agua del mar, el agua de los ríos y la niebla, cada una personificada por tres dioses: la madre Ti'amat, el padre Apsu y el sirviente (¿?) Mummu. El agua del mar y el agua de los ríos engendraron a Lahmu y Lahamu, dioses que representaban el sedimento, y éstos engendraron a Anshar y Kishar, los dos horizontes —entendidos como el límite del cielo y el límite de la Tierra—. En aquellos tiempos, el cielo y la Tierra estaban unidos; según la versión más antigua del mito, el dios de los vientos separó el cielo de la Tierra; en la versión más elaborada, esa hazaña le correspondió a Marduk, dios principal de los babilonios. Marduk se enfrentó a Ti'amat, diosa del mar, la mató, cortó su cuerpo en dos y, separando las dos partes, construyó el cielo y la Tierra. Posteriormente, creó el Sol, la Luna y las estrellas, que colocó en el cielo.

Así, para los babilonios, el mundo era una especie de bolsa llena de aire, cuyo piso era la Tierra y el techo la bóveda celeste. Arriba y abajo se encontraban las aguas primordiales, que a veces se filtraban, produciendo la lluvia y los ríos.

Como todos los mitos, la cosmogonía babilonia estaba basada en fenómenos naturales que fueron extrapolados a dimensiones fabulosas: Mesopotamia se encuentra entre los ríos Tigris y Éufrates, que desembocan en el Golfo Pérsico; allí depositan su sedimento, de modo tal que la tierra gana lentamente espacio al mar. Seguramente fue ese hecho el que sugirió a los babilonios la creación de la tierra firme a partir de las aguas primordiales.

La influencia del mito babilónico se puede apreciar en la cosmogonía egipcia. Para los egipcios, Atum, el dios Sol, engendró a Chu y Tefnut, el aire y la humedad, y éstos engendraron a Nut y Geb, el cielo y la Tierra, quienes a su vez engendraron los demás dioses del panteón egipcio. En el principio, el cielo y la Tierra estaban unidos, pero Chu, el aire, los separó, formando así el mundo habitable (Figura 1).

Para los egipcios, el Universo era una caja, alargada de norte a sur tal como su país; alrededor de la Tierra fluía el río Ur-Nes, uno de cuyos brazos era el Nilo, que nacía en el sur. Durante el día, el Sol recorría el cielo de oriente a poniente y, durante la noche, rodeaba la Tierra por el norte en un barco que navegaba por el río Ur-Nes, escondida su luz de los humanos detrás de las altas montañas del valle Dait.

Trazas del mito babilónico también se encuentran en el Génesis hebreo. Según el texto bíblico, el espíritu de Dios se movía sobre la faz de las aguas en el primer día de la creación; pero la palabra original que se traduce comúnmente como *espíritu* es *ruaj*, que en hebreo significa literalmente viento. Para entender el significado del texto, hay que recordar que, antiguamente, el aire o el soplo tenían la connotación de ánima o espíritu (verbigracia el "soplo divino" infundido a Adán (1)). En el segundo día, prosigue el texto, Dios puso el firmamento (2) entre las aguas superiores y las inferiores; esta vez, la palabra original es *rakía*, un vocablo arcaico que suele traducirse como firmamento, pero que tiene la misma raíz que la palabra *vacío*. En el tercer día, Dios separó la tierra firme de las aguas que quedaron abajo[....] Estos pasajes oscuros del Génesis se aclaran si recordamos el mito babilónico: Marduk —el viento, en la versión más antigua— separa las aguas (el cuerpo de Ti'amat) para formar el mundo, y la tierra firme surge como sedimento de las aguas primordiales.

Figura 1. Chu, dios del aire, levanta el cuepro estrellado de la diosa del cielo Nut, separándola de su esposo Geb, dios de la Tierra (Museo Nacional de Antigüedades, Leyden, Holanda).

En el *Veda* de los antiguos hindúes se encuentran varias versiones de la creación del mundo. La idea común en ellas es que el Universo nació de un estado primordial indefinible; después de pasar por varias etapas, habrá de morir cuando el tiempo llegue a su fin; entonces se iniciará un nuevo ciclo de creación, evolución y destrucción, y así sucesivamente. Según el *Rig Veda*, en el principio había el no-ser, del que surgió el ser al tomar conciencia de sí mismo: el demiurgo Prajapati, creador del cielo y la Tierra, el que separó la luz de las tinieblas y creó el primer hombre. En otro mito, el dios Visnu flotaba sobre las aguas primordiales, montado sobre la serpiente sin fin Ananta; de su ombligo brotó una flor de loto, del que nació Brahma para forjar el mundo.

Según los mitos hindúes el Universo era una superposición de tres mundos: el cielo, el aire y la Tierra. La Tierra era plana y circular, y en su centro se encontraba el mítico monte Sumeru (probablemente identificado con el Himalaya), al sur del cual estaba la India, en un continente circular rodeado por el océano. El cielo tenía siete niveles y el séptimo era la morada de Brahma; otros siete niveles tenía el infierno, debajo de la Tierra.

A raíz de la conquista de la India por Alejandro Magno en el siglo IV a.C., las ideas cosmológicas de los hindúes fueron modificadas sustancialmente. Así, en los libros llamados *Siddharta*, se afirma que la Tierra es esférica y no está sostenida en el espacio, y que el Sol y los planetas giran alrededor de ella. Como dato curioso, se menciona a un tal Aryabhata, quien en el siglo V d.C., sostuvo que las estrellas se encuentran fijas y la Tierra gira; desgraciadamente, el texto no da más detalles que los necesarios para refutar tan extraña teoría.

La concepción del Universo en la China antigua se encuentra expuesta en el *Chou pi suan ching*, un tratado escrito alrededor del siglo IV a.C. Según la teoría del *Kai t'ien* (que significa: el cielo como cubierta), el cielo y la Tierra son planos y se encuentran separados por una distancia de 80 000 *li* —un *li* equivale aproximadamente a medio kilómetro. El Sol, cuyo diámetro es de 1 250 *li*, se mueve circularmente en el plano del cielo; cuando se encuentra encima de China es de día, y cuando se aleja se hace noche. Posteriormente, se tuvo que modificar el modelo para explicar el paso del Sol por el horizonte; según la nueva versión del *Kai t'ien*, el cielo y la Tierra son semiesferas concéntricas, siendo el radio de la semiesfera terrestre de 60 000 *li*. El texto no explica cómo se obtuvieron las distancias mencionadas; al parecer, el modelo fue diseñado principalmente para calcular, con un poco de geometría, la latitud de un lugar a partir de la posición del Sol.

El *Kai t'ien* era demasiado complicado para cálculos prácticos y cayó en desuso con el paso del tiempo. Alrededor del siglo II d.C., se empezó a utilizar la esfera armilar como un modelo mecánico de la Tierra y el cielo. Al mismo tiempo surgió

una nueva concepción del Universo: la teoría del *hun t'ien* (cielo envolvente), según la cual: "... el cielo es como un huevo de gallina, tan redondo como una bala de ballesta; la Tierra es como la yema del huevo, se encuentra sola en el centro. El cielo es grande y la Tierra pequeña."

Además, se asignó el valor de 1 071 000 *li* a la circunferencia de la esfera celeste, pero el texto no explica cómo fue medida.

Posteriormente, las teorías cosmogónicas en China girarán alrededor de la idea de que el Universo estaba formado por dos sustancias: el *yang* y el *yin*, asociados al movimiento y al reposo, respectivamente. De acuerdo con la escuela neoconfucionista, representada principalmente por Chu Hsi en el siglo XII, el *yang* y el *yin* se encontraban mezclados antes de que se formara el mundo, pero fueron separados por la rotación del Universo. El *yang* móvil fue arrojado a la periferia y formó el cielo, mientras que el *yin* inerte se quedó en el centro y formó la Tierra; los elementos intermedios, como los seres vivos y los planetas, guardaron proporciones variables de *yang* y *yin*.

Mencionemos también la cultura maya, que floreció en Mesoamérica, principalmente entre los siglos IV y IX de nuestra era. De lo poco que se ha podido descifrar de sus jeroglíficos, sabemos que los mayas habían realizado observaciones astronómicas de una precisión que apenas se ha podido igualar en nuestro siglo. Los mayas usaban un sistema vigesimal con cero, con el cual realizaban complicados cálculos astronómicos; su calendario era más preciso que el gregoriano usado en la actualidad, y habían medido la precesión del eje de rotación terrestre con un error de sólo 54 días en 25 720 años.

En contraste con el excelencia de sus observaciones, las concepciones cosmológicas de los mayas eran bastante primitivas —por lo menos hasta donde se ha averiguado—. Creían que la Tierra era rectangular y que el Sol giraba alrededor de ella. El día del solsticio, el Sol salía de una de las esquinas de la Tierra y se metía por la opuesta; luego, cada día, la órbita del Sol se recorría hasta que, en el siguiente solsticio —seis meses después—, el Sol salía y se metía por las otras dos esquinas terrestres. Los mayas tenían especial cuidado de construir sus templos según la orientación de los lados de la Tierra.

Al igual que otros pueblos, los mayas creían en la existencia de siete cielos, (3) planos y superpuestos, y de otros tantos niveles subterráneos, donde residían dioses y demonios, respectivamente. El mundo había sido creado por *Hun ab ku* (literalmente: uno-existir-dios) a partir de aguas primordiales inicialmente en completo reposo. Antes del mundo actual, habían existido otros mundos que acabaron en respectivos diluvios.

COSMOLOGÍA Y COSMOGONÍA DE GRECIA Y LA EDAD MEDIA

Por razones históricas que no pretendemos analizar aquí, la cultura griega se distingue de otras culturas antiguas por haber servido de semilla a la llamada "civilización occidental"; por esta razón la consideramos con un poco más de detalle, aprovechando el conocimiento relativamente más amplio que se tiene de ella.

A algunos pensadores griegos se deben los primeros intentos, aún muy limitados, de concebir al mundo como el resultado de procesos naturales y no como una obra incomprensible de los dioses. Tal es el caso de los filósofos de la escuela jónica, que floreció alrededor del siglo VI a.C. y según la cual el Universo se encontraba inicialmente en un estado de Unidad Primordial, en el que todo estaba mezclado; de esa Unidad surgieron pares de opuestos —caliente y frío, mojado y seco, etc.— cuyas interacciones entre sí produjeron los cuerpos celestes, por un lado, y la Tierra, con sus plantas y animales, por otro.

Los filósofos jónicos concebían a la Tierra como un disco plano que flotaba en el centro de la esfera celeste. Pero, ya en el siglo V a.C., los griegos se habían dado cuenta, a través de varios indicios, de que la Tierra es redonda. Hasta donde sabemos, el primero en afirmarlo fue el legendario Pitágoras; seguramente llegó a esa conclusión a partir de hechos observados, pero los argumentos que manejó fueron de índole metafísica: la Tierra tenía que ser esférica porque, supuestamente, la esfera es el cuerpo geométrico más perfecto.

Por lo que respecta al movimiento de las estrellas, lo más evidente era que el cielo, y sus astros, giraban alrededor de la Tierra. Sin embargo, Filolao, un discípulo de Pitágoras, propuso un curioso sistema cósmico según el cual el día y la noche eran producidos por la rotación de la Tierra alrededor de un centro cósmico; a pesar de ser erróneo, este sistema tuvo el mérito de asignarle cierto movimiento a la Tierra y dejar de considerarla como un cuerpo fijo en el espacio. Se sabe también que los filósofos de la escuela pitagórica Ecfanto y Heráclides de Ponto propusieron que es la Tierra la que gira alrededor de su eje en un día y no las estrellas, aunque todavía creían que el recorrido anual del Sol por la eclíptica se debía a que giraba alrededor de la Tierra en un año.

Al parecer, el primer hombre en la historia que propuso el sistema heliocéntrico —según el cual la Tierra gira alrededor del Sol en un año y sobre su propio eje en un día— fue Aristarco de Samos, quien vivió en Alejandría en el siglo III a.C. Desgraciadamente, no se conserva ningún documento escrito originalmente por Aristarco y todo lo que se conoce de él es por referencias en escritos de otros filósofos. No sabemos en qué se basó para elaborar una teoría que se anticipó a la de Copérnico en más de diecisiete siglos.

No todos los filósofos griegos aceptaban que la Tierra, aparentemente tan firme y sólida, pudiera poseer algún movimiento propio. De hecho, los dos más importantes, Platón y Aristóteles, sostuvieron lo contrario, y fueron ellos quienes más influyeron en los siglos siguientes.

Platón (427-347 a.C.) describe su visión de la creación cósmica en el diálogo de *Timeo*. Por supuesto, el relato tiene un alto valor poético pero carece de cualquier fundamento físico (lo cual no tenía importancia para Pláton, pues creía en la primacía de las Ideas) Así, Platón narra, por boca de Timeo, cómo el Demiurgo creó el mundo a partir de cuatro elementos —aire, agua, fuego y tierra— y puso en él a los seres vivos: los dioses que moran en el cielo, los pájaros que viven en el aire, los animales que habitan en la tierra y en el agua. El Universo así creado debía ser esférico y los astros moverse circularmente, porque la esfera es el cuerpo más perfecto y perfecto es el movimiento circular.

Aristóteles (384-322 a.C.) desarrolló un sistema del mundo mucho más elaborado que el de su maestro Platón. Declaró explícitamente que la Tierra es esférica y que se encuentra inmóvil en el centro del Universo, siendo el cielo, con todos sus astros, el que gira alrededor de ella. Más aún, postuló una diferencia fundamental entre los cuerpos terrestres y los celestes. Según Aristóteles, los cuerpos terrestres estaban formados por los cuatro elementos fundamentales y éstos poseían movimientos naturales propios: la tierra y el agua hacia el centro de la Tierra, el aire y el fuego en sentido contrario. En cuanto a los cuerpos celestes, estaban formados por una quinta sustancia, (4) incorruptible e inmutable, cuyo movimiento natural era el circular. Aristóteles asignó al Sol, a la Luna y a los planetas respectivas esferas rotantes sobre las que estaban afianzadas. Las estrellas, a su vez, se encontraban fijas sobre una esfera que giraba alrededor de la Tierra y correspondía a la frontera del Universo. Pero, ¿qué había más allá de la esfera estelar ? Aquí, Aristóteles tuvo que recurrir a varios malabarismos filosóficos para explicar que, más allá, nada existía, pero que esa nada no equivalía a un vacío en extensión; todo para decir que el Universo "realmente" se terminaba en la esfera celeste.

Todo habría funcionado muy bien en el sistema de esferas ideales de Aristóteles si no fuese porque los planetas, esos astros errantes, vagaban por el cielo ajenos a la perfección del movimiento circular. En general, recorrían la bóveda celeste de oriente a poniente, pero a veces se detenían y regresaban sobre sus pasos, para volver a seguir su camino en una forma que desafiaba toda explicación simple (Figura 2).

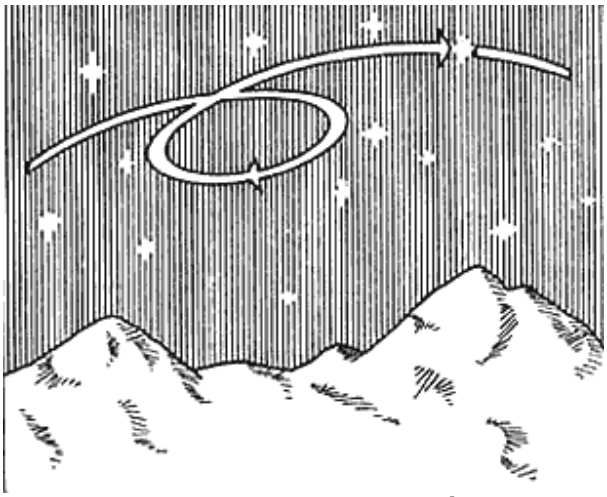

Figura 2. Movimiento característico de un planeta en la bóveda celeste.

Aristóteles adoptó el sistema de su contemporáneo Eudoxio, que explicaba razonablemente bien el movimiento de los planetas. Este modelo consistía de un conjunto de esferas concéntricas, cuyo centro común era la Tierra, y que giraban unas sobre otras alrededor de ejes que se encontraban a diversos ángulos. Suponiendo que los planetas se encuentran fijos en algunas de esas esferas, se lograba reconstruir sus movimientos con cierta precisión; aunque el sistema necesitaba no menos de 55 esferas concéntricas para reproducir el movimiento de los planetas.

Aristóteles también supuso que la esfera correspondiente a la Luna señalaba el límite del mundo material —el terrestre—, y que más allá de la esfera lunar el Universo dejaba de regirse por las leyes de la naturaleza mundana. No sabemos si Aristóteles tomaba en serio sus propias teorías cosmológicas, pero seguramente se habría sorprendido de que éstas se volvieran artículos de fe quince siglos después de su muerte.

Los astrónomos griegos fueron los primeros en tratar de medir con métodos prácticos las dimensiones del mundo en que vivían, sin basarse en especulaciones o mitos. Así, por ejemplo, el mismo Aristarco de Samos que sostuvo la doctrina heliocéntrica, intentó determinar la distancia entre la Tierra y el Sol. Para ello, midió la posición de la Luna en el momento exacto en que la fase lunar se encontraba a la mitad (Figura 3), lo cual permitía, con un poco de geometría, encontrar la relación entre los radios de la órbita lunar y la terrestre. Desgraciadamente, si bien el método es correcto, la medición es irrealizable en la práctica con la precisión necesaria. Aristarco calculó que la distancia de la Tierra al Sol es de unas veinte veces el radio de la órbita lunar, cuando el valor correcto es casi 400. Curiosamente, esta razón de 20 a 1 habría de subsistir hasta tiempos de Copérnico, y aún después.

Eratóstenes, quien vivió en Alejandría en el siglo II a.C., logró medir con éxito el radio de la circunferencia terrestre. Notó que en el día del solsticio las sombras

caían verticalmente en Siena, mientras que en Alejandría —más al norte—, formaban un ángulo con la vertical que nunca llegaba a ser nulo (Figura 4). Midiendo el ángulo mínimo y la distancia entre Alejandría y Siena, Eratóstenes encontró que la Tierra tenía una circunferencia de 252 000 estadios, o en unidades modernas y tomando el valor más problable del estadio: 39 690 kilómetros, ¡apenas 400 kilómetros menos del valor correcto! Aunque hay que reconocer que Eratóstenes tuvo algo de suerte, pues su método era demasiado rudimentario para obtener un resultado tan preciso.

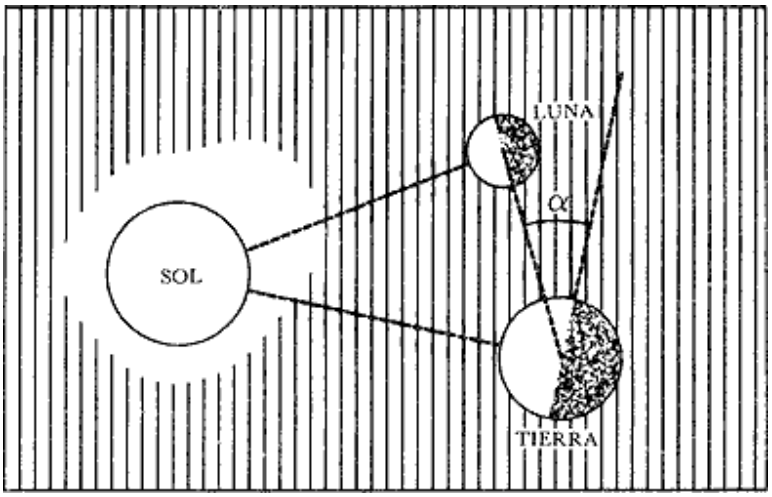

Figura 3. Método de Aristarco para medir la razón de las distancias Tierra-Luna a Tierra -Sol. Esta razón es proporcional al ángulo a.

En el siglo II a.C., Hiparco, el más grande astrónomo de la Antigüedad, ideó un ingenioso método para encontrar las distancias de la Tierra a la Luna y al Sol. Hiparco midió el tiempo que tarda la Luna en atravesar la sombra de la Tierra durante un eclipse lunar y, a partir de cálculos geométricos, dedujo que la distancia Tierra-Luna era de unos 60 5/6 radios terrestres: ¡excelente resultado si se compara con el valor real, que es de 60.3 radios terrestres! También intentó Hiparco medir la distancia al Sol, pero sus métodos no eran suficientemente precisos, por lo que obtuvo una distancia de 2 103 radios terrestres, un poco más de lo que encontró Aristarco pero todavía menos de una décima parte de la distancia real.

En resumen, podemos afirmar que, ya en el siglo II a.C., los griegos tenían una excelente idea de los tamaños de la Tierra y la Luna y de la distancia que los separa, pero situaban al Sol mucho más cerca de lo que se encuentra.

El último astrónomo griego de la Antigüedad fue Tolomeo 151vivió en Alejandría en el siglo II a.C.151 y sus ideas influyeron notablemente en la Europa de la Edad Media. Tolomeo aceptó la idea de que la Tierra es el centro del Universo y que los cuerpos celestes giran alrededor de ella; pero las esferas de Eudoxio eran demasiado complicadas para hacer cualquier cálculo práctico, así que propuso un

sistema diferente, según el cual los planetas se movían sobre epiciclos: círculos girando alrededor de círculos (Figura 5). Tolomeo describió sus métodos para calcular la posición de los cuerpos celestes en su famoso libro *Sintaxis* o *Almagesto*. Es un hecho curioso que nunca mencionó en ese libro si creía en la realidad física de los epiciclos o los consideraba sólo construcciones matemáticas; es probable que haya soslayado este problema por no tener una respuesta convincente. Mencionemos también, como dato interesante, que Tolomeo citó las mediciones que hizo Hiparco de las distancias a la Luna y al Sol, pero él mismo las "corrigió" para dar los valores más pequeños —y menos correctos— de 59 y 1 210 radios terrestres, respectivamente.

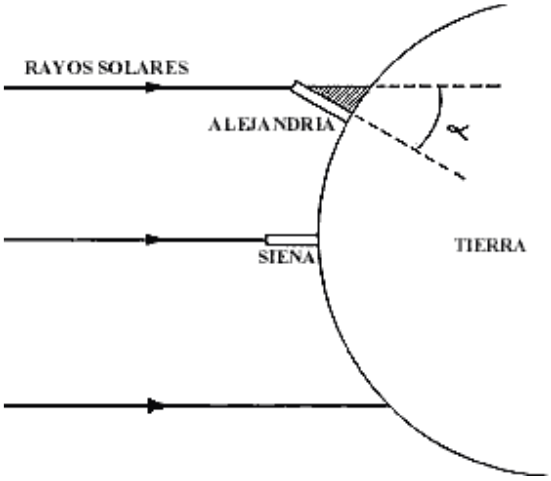

Figura 4. Conociendo al ángulo a y la distancia de Siena, la actual Assuán, a Alejandría, Eratóstenes midió el radio terrestre.

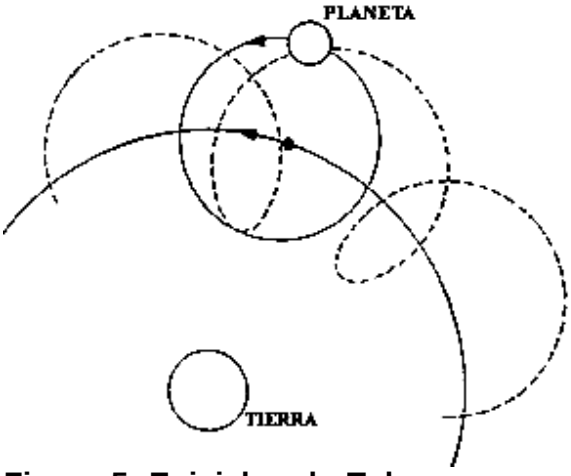

Figura 5. Epiciclos de Tolomeo para explicar el movimiento aparente de un planeta.

No podemos dejar de mencionar al filósofo romano Lucrecio, del siglo I a.C., y su famosa obra *De Rerum Natura*, en la que encontramos una concepción del

Universo muy cercana a la moderna, en algunos sentidos, y extrañamente retrógrada, en otros. Según Lucrecio, la materia estaba constituida de átomos imperecederos. Éstos se encuentran eternamente en movimiento, se unen y se separan constantemente, formando y deshaciendo tierras y soles, en una sucesión sin fin. Nuestro mundo es sólo uno entre un infinito de mundos coexistentes; la Tierra fue creada por la unión casual de innumerables átomos y no está lejano su fin, cuando los átomos que la forman se disgreguen. Mas Lucrecio no podía aceptar que la Tierra fuera redonda; de ser así, afirmaba, toda la materia del Universo tendería a acumularse en nuestro planeta por su atracción gravitacional. En realidad, cuando Lucrecio hablaba de un número infinito de mundos se refería a sistemas semejantes al que creía era el nuestro: una tierra plana contenida en una esfera celeste. Pero indudablemente, a pesar de sus desaciertos, la visión cósmica de Lucrecio no deja de ser curiosamente profética.

La cultura griega siguió floreciendo mientras Grecia fue parte del Imperio romano. Pero en el siglo IV de nuestra era, este vasto Imperio se desmoronó bajo las invasiones de los pueblos germánicos y asiáticos. Por esa misma época, Roma adoptó el cristianismo; y los cristianos, que habían sido perseguidos cruelmente por los romanos paganos, repudiaron todo lo que tuviera que ver con la cultura de sus antiguos opresores. Toda la "filosofía pagana" —es decir: la grecorromana— fue liquidada y sustituida por una nueva visión del mundo, basada íntegramente en la religión cristiana. El mundo sólo podía estudiarse a través de la Biblia, interpretada literalmente, y lo que no estuviera en la Biblia no era de la incumbencia humana. Así, la Tierra volvió a ser plana, y los epiciclos fueron sustituidos por ángeles que movían a los planetas según los designios inescrutables de Dios.

Afortunadamente, los árabes en esa época sí apreciaban la cultura griega: conservaron y tradujeron los escritos de los filósofos griegos mientras los cristianos los quemaban. Así, la cultura griega pudo volver a penetrar en Europa, a través de los árabes, cuando la furia antipagana había amainado. En el siglo XIII, Tomás de Aquino redescubrió a Aristóteles y lo reivindicó, aceptando íntegramente su sistema del mundo. Y así, ya "bautizada" por Santo Tomás, la doctrina aristotélica se volvió dogma de fe y posición oficial de la Iglesia: ya no se estudiaba al mundo a través de la Biblia, únicamente, sino también por medio de Aristóteles. Y por lo que respecta a la astronomía, la última palabra volvió a ser el *Almagesto* de Tolomeo —preservado gracias a una traducción árabe.

NOTAS

(1) También en griego se usa una sola palabra, *pneuma*, para el aire y el ánima.

(2) En la traducción de Casiodoro de Reyna se usa la palabra expansión, que parece ser más adecuada.

(3) El concepto de los siete cielos, común a culturas muy diversas, tiene una explicación simple: son siete los cuerpos celestes: el Sol, la Luna y los cinco planetas visibles.

(4) La famosa *quintaesencia* que, según los filósofos medievales, permeaba a los cuerpos terrestres y formaba sus ánimas.

II. EL FIN DE LOS MITOS

> —Sin duda alguna, Sancho, que ya debemos de llegar a la segunda región del aire, adonde se engendra el granizo, las nieves; los truenos, los relámpagos y los rayos se engendran en la tercera región; y si es que desta manera vamos subiendo, presto daremos en la región del fuego...
>
> *El ingenioso hidalgo*
>
> *Don Quijote de la Mancha*

LA REVOLUCIÓN DE COPÉRNICO Y SUS CONSECUENCIAS

LA SITUACIÓN empezó a cambiar cuando Copérnico, poco antes de su muerte en 1543, mandó a la imprenta su famoso libro *De Revolutionibus*, en el que afirmaba que la Tierra y los planetas giran alrededor del Sol. Copérnico pretendía no sólo defender el sistema heliocéntrico, sino también elaborar un modelo para calcular las posiciones de los astros con mayor precisión que Tolomeo. Desgraciadamente, no pudo liberarse de la supuesta perfección del movimiento circular y tuvo que recurrir a los embrollosos epiciclos para poder describir el detalle fino de los movimientos planetarios. Hay que reconocer que si la teoría de Copérnico no fue aceptada de inmediato, se debió en parte a que, para fines prácticos, no era más simple que el sistema de Tolomeo.

Uno de los argumentos fuertes en contra del sistema de Aristarco y Copérnico era que las estrellas no mostraban ninguna *paralaje* durante el año terrestre. En efecto, la posición de las estrellas debería de variar por cierto ángulo (la paralaje) durante el recorrido anual de la Tierra alrededor del Sol (Figura 6). Hoy en día sabemos que este efecto existe, pero que es demasiado pequeño para medirse fácilmente. Copérnico argumentó, con justa razón, que la paralaje estelar no puede percibirse porque las estrellas se encuentran demasiado distantes (a distancias que resultaban fabulosas en esa época, ¡Y que eran mucho menores que las reales!). Pero no pudo abandonar la esfera celeste y siguió colocando a las estrellas sobre una bóveda de dimensiones inconcebibles, pero de todos modos finita. Mencionemos también, como dato curioso, que Copérnico rehizo y aceptó sin grandes modificaciones los cálculos de Tolomeo de la distancia Tierra-Sol, valor veinte veces menos que el real. En cuanto a dimensiones, el universo de Copérnico no difería del de los antiguos griegos.

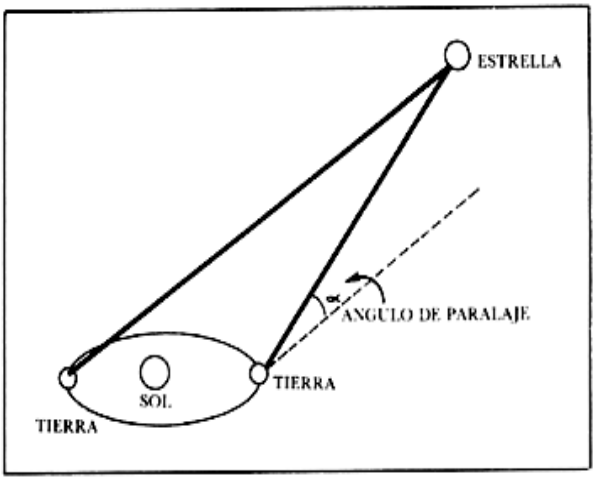

Figura 6. Midiendo el ángulo de paralaje a y conociendo el radio de la órbita terrestre, se deduce la distancia a una estrella.

Empero, al privarse a la bóveda estelar de un movimiento real, surgió la posibilidad de que el Universo no tuviera límites. Poco después de la muerte de Copérnico, el inglés Thomas Digges publicó su propia versión del sistema copernicano en el que presentaba al sistema solar rodeado de una distribución *infinita* de estrellas (Figura 7). Pero el reino de las estrellas de Digges no era semejante a nuestro mundo humano, sino que era la morada de Dios y sus ángeles.

A Giordano Bruno corresponde el mérito de haber concebido un Universo más mundano: ".... existen un número innumerable de soles, y un número infinito de tierras que giran alrededor de esos soles...", se atrevió a afirmar. Sin embargo, Bruno llegó a tales conclusiones a partir de especulaciones metafísicas que poco tenían que ver con un método científico. Su visión del mundo es, en realidad, animista, y se acerca más al panteísmo que a la ciencia moderna. Y si puso al Sol en el centro del sistema solar, no fue por razones astronómicas, sino porque le asignaba a ese astro propiedades vitalistas, al estilo de la filosofía hermética de su época. De todos modos, las ideas de Bruno le valieron ser acusado de hereje y morir en una hoguera de la Santa Inquisición justo cuando se iniciaba el siglo XVII.

Figura 7. El Universo según Digges (de A Perfit Description of the Caelestial Orbes, 1576.)

Un siglo después de Copérnico, el gran astrónomo Kepler se propuso encontrar las "armonías" que rigen el movimiento de los planetas. Convencido de que el Sol es el centro del Universo, Kepler dedicó largos y penosos años a estudiar los datos observacionales, recopilados por su maestro Tycho Brahe y él mismo, con la esperanza de encontrar algunas leyes simples que rijan con toda precisión el curso de los planetas. Su búsqueda no fue vana; Kepler descubrió las famosas tres leyes que ahora llevan su nombre. De golpe, se desmoronó el embrolloso sistema de epiciclos, del que ni Copérnico había podido liberarse, para dejar lugar a la inesperada simplicidad de las elipses. (1)

A Kepler le desagradaba la idea de un Universo infinito. Consideraba la cuestión de la finitud o infinitud del mundo como ajeno a la experiencia humana. Pero, además, encontró un argumento para demostrar que el Sol era muy diferente de las estrellas. Antes de que se inventaran los telescopios, se creía que el tamaño aparente de las estrellas correspondía a su tamaño real; se manejaba un valor típico de 2 minutos de arco para el diámetro aparente de una estrella. Kepler demostró que si las estrellas se encontraban tan distantes como lo implicaba el sistema de Copérnico, el diámetro real de una estrella típica debería de ser mayor que la órbita terrestre. Más aún, el cielo visto desde una estrella tendría una apariencia muy distinta de la que se observa desde la Tierra: las estrellas se verían como grandes bolas de luz y no como pequeños puntos luminosos. Hoy en día, sabemos que el tamaño aparente de una estrella es sólo un espejismo producido por la atmósfera terrestre, que ensancha su imagen, pero este fenómeno era desconocido en tiempos de Kepler, por lo que su argumento parecía perfectamente sólido.

El sistema de Copérnico encontró otro gran defensor en un contemporáneo de Kepler: Galileo. Quizás no fue Galileo el primer hombre que miró el cielo a través de un telescopio, pero sí fue el primero en hacerlo sistemáticamente, en interpretar sus observaciones y, sobre todo, en divulgar sus descubrimientos y hacerlos accesibles a un círculo más amplio que el de los eruditos versados en latín. Desde temprano fue Galileo un apasionado defensor de Copérnico y sus observaciones astronómicas vinieron a confirmar sus convicciones. Pero, bajo la presión de los aristótelicos que dominaban la vida cultural de esa época, la Iglesia romana ya había tomado partido por el sistema geocéntrico, por supuestas congruencias con narraciones bíblicas. Galileo se propuso convencer con pruebas objetivas a los altos prelados de la Iglesia de que Copérnico tenía razón; pero después de insistir varios años, sólo obtuvo una prohibición oficial de enseñar el sistema heliocéntrico.

A pesar de todo, Galileo publicó, en 1632, el *Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo,* libro en el que confrontaba, de una manera supuestamente imparcial, las doctrinas de Aristóteles y de Copérnico. Pero nadie podía engañarse con las simpatías del autor: el héroe del libro era Salviati, defensor de Copérnico, quien refutaba uno por uno los argumentos de su contrincante, el filósofo peripatético Simplicio, torpe defensor de Aristóteles. El *Diálogo* fue escrito originalmente en italiano y pretendía ser un libro de divulgación más que un texto científico. Del sistema de Copérnico, sólo aparecía la idea heliocéntrica, sin los embrollos matemáticos de la teoría. No todos los argumentos de Galileo eran claros, o aun verdaderos: al final del libro, por ejemplo, aparece una teoría de las mareas, totalmente errónea, con la cual pretendía demostrar el movimiento de la Tierra. Más aún, no se menciona en el libro ni media palabra de los descubrimientos de Kepler, que Galileo no pudo valorar correctamente. Pero a pesar de sus limitaciones, el *Diálogo* tuvo el efecto suficiente para causar revuelo en el medio científico y religioso. Apenas publicado, fue vetado por la Iglesia, y Galileo fue juzgado y condenado a retractarse de sus convicciones. (2)

Por lo que respecta a la cosmología, Galileo descubrió que la Vía Láctea está compuesta por una infinitud de pequeñas estrellas que sólo pueden distinguirse con un telescopio. Así se aclaraba el misterio de esa banda luminosa en el cielo que tanto había despertado la imaginación de los filósofos y los poetas.

También descubrió Galileo que el telescopio reducía el tamaño aparente de las estrellas. Sospechó que tal tamaño era una ilusión óptica y la achacó al mecanismo de visión del ojo. Sin embargo, siguió pensando que el diámetro aparente no era totalmente ilusorio y le adscribió un valor promedio de 5 segundos a una estrella de primera magnitud y 5/6 de segundos a una de sexta. A partir de ahí, Galileo calculó que una estrella de sexta magnitud debía de encontrarse a 2 160 unidades astronómicas. (3) Aunque todavía erróneo, este valor permitía considerar seriamente que las estrellas son semejantes a nuestro Sol.

En cuanto al tamaño del Universo, Galileo se mostró excepcionalmente cauto al respecto. "Es aún incierto (y creo que lo será siempre para la ciencia humana) si el mundo es finito o, lo contrario, infinito..." llegó a afirmar, (4) y con cierta razón, pues cualquier otra posición basada en los conocimientos de su época hubiera sido simple especulación.

Las observaciones de Galileo permitieron alejar suficientemente a las estrellas para que no pareciera descabellado afirmar que el Sol es una estrella común, cuya única particularidad es estar muy cerca de nosotros. A Christian Huygens (1629-1695) corresponde el primer intento de medir la distancia a las estrellas. Suponiendo que la estrella Sirio es igual al Sol, Huygens trató de comparar el brillo de estos dos astros para determinar sus distancias relativas. Para ello hizo pasar la luz del Sol a través de unos pequeñísimos agujeros, hasta que la cantidad de luz solar que quedaba le pareciera comparable a la luz de Sirio. Conociendo el tamaño de los agujeros, calculó que si el diámetro solar fuese 27 664 menor de lo que es, el Sol se vería con el mismo brillo que Sirio. Por lo tanto, esta estrella debería encontrarse 27 664 veces más alejada de la Tierra que el Sol. Y Huygens no dejó de admirarse de tan fabulosa distancia:

> una bala de cañón tardaría cientos de miles de años en llegar a las estrellas... y sin embargo, cuando las vemos en una noche clara, nos imaginamos que se encuentran a no más de unas cuantas millas encima de nuestras cabezas... y que número tan prodigioso de estrellas debe haber aparte de éstas, tan remotas de nosotros... (5)

No se imaginó Huygens que la distancia que calculó era veinte veces menor que la real, y que ésta a su vez es un modestísimo intervalo, casi humano, en la escala cósmica.

La manera correcta de calcular las distancias relativas del Sol y las estrellas (suponiendo que todas tienen el mismo brillo real) es comparar directamente sus brillos aparentes. Una ley simple y fundamental de la óptica es que la luminosidad aparente de un objeto disminuye como el cuadrado de su distancia: así, por ejemplo, un foco colocado a 20 metros se ve 4 veces menos brillante que si estuviera a 10 metros, a 80 metros se ve 9 veces menos brillante, etc. Debido a la gran disparidad entre el brillo del Sol y el de cualquier estrella, es imposible compararlas con suficiente precisión. En 1668, el matemático escocés James Gregory tuvo la idea de comparar una estrella con Júpiter, cuyo brillo relativo con respecto al Sol puede calcularse indirectamente a partir de la distancia y la reflectividad de este planeta. El método es esencialmente correcto (a diferencia

del de Huygens) y Gregory encontró que Sirio se encuentra a 83 190 unidades astronómicas.

LA SÍNTESIS NEWTONIANA

Hasta tiempos de Galileo, y aun después, no se había percibido ninguna relación entre la caída de los cuerpos en la Tierra y el movimiento de los planetas en el cielo. Nadie había refutado la doctrina de Aristóteles de que los fenómenos terrestres y los celestes son de naturaleza totalmente distinta, y que los sucesos más allá de la órbita lunar no pueden entenderse con base en nuestras experiencias mundanas.

La situación cambió drásticamente cuando Isaac Newton descubrió que la gravitación es un fenómeno *universal.* Todos los cuerpos en el Universo —ya sean manzanas, planetas o estrellas— se atraen entre sí gravitacionalmente; y la fuerza de atracción (F) entre dos cuerpos es proporcional a sus masas (M1 y M2) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (D) que los separa:

$$F = \frac{GM_1M_2}{D^2}$$

donde G es la constante de la gravitación.

Según una leyenda muy conocida, Newton llegó a tales conclusiones un día que, sentado bajo un manzano y meditando sobre el por qué la Luna se mantiene unida a la Tierra, vio caer una manzana. La realidad es más complicada: Newton encontró la clave del sistema del mundo en las leyes de Kepler. Guiado por ellas, logró demostrar que el movimiento de los planetas es producido por la atracción gravitacional del Sol sobre ellos. Para tal hazaña intelectual, que ocurrió en los años 1684-1685, Newton utilizó un poderosísimo método matemático que él mismo había inventado en su juventud. (6) Sus resultados los publicó en 1686 en el célebre libro llamado los *Principia*, que señala el nacimiento de la física como ciencia exacta.

El problema del movimiento de los planetas había sido resuelto finalmente, pero quedaban las estrellas. Inspirado seguramente por el método de Gregory, Newton hizo un cálculo simple (7) para demostrar que el Sol se vería del mismo brillo que Saturno si estuviera 60 000 veces más alejado (suponiendo que este planeta refleja una cuarta parte de la luz solar). Este valor equivale a unas 600 000 unidades astrónomicas, que sería la distancia típica a una estrella de primera

magnitud, en perfecto acuerdo con los conocimientos modernos (Sirio, por ejemplo, se encuentra a 550 000 unidades astronómicas). Así, en tiempos de Newton ya se tenía plena conciencia de las distancias interestelares. También son de esa época los primeros intentos de calcular la distancia de la Tierra al Sol, midiendo la paralaje del Sol visto desde dos lugares alejados de la Tierra; los resultados obtenidos no eran demasiado erróneos. (8)

La existencia de la gravitación universal implica que las estrellas deben estar, efectivamente, muy alejadas para no influir sobre el Sol y sus planetas. Pero, aun infinitesimal, esa atracción no puede ser totalmente nula: un conglomerado de estrellas acabaría por colapsarse sobre sí mismo debido a la atracción entre sus partes, y ése sería el destino de un Universo finito. Newton llegó a la conclusión de que, para que ello no suceda, el Universo debe ser infinito y uniforme; sólo pequeñas regiones pueden colapsarse sobre sí mismas para formar regiones más densas —y es quizás así como se forman las estrellas, especuló el gran científico inglés.

Con el surgimiento de la física newtoniana quedó liquidada definitivamente la física aristotélica, con sus esferas celestes y regiones empíreas. No quedaba duda: nuestro sistema solar es apenas un punto en el espacio y las estrellas son las verdaderas componentes del Universo.

¿FINITO O INFINITO?

Desgraciadamente, un Universo infinito no estaba excento de problemas. Prueba de ello es una famosa paradoja que se atribuye a Wilhelm Olbers, quien la publicó en 1823, y que intrigó a los cosmólogos durante más de un siglo. El problema fue señalado por primera vez por el astrónomo inglés Halley —contemporáneo de Newton— y consiste en el hecho de que el cielo debería ser infinitamente brillante si el Universo fuera infinito.

Supongamos que dividimos el Universo en una serie de cáscaras esféricas de igual grosor y con centro en el Sistema Solar, tal como se ve en la figura 8. Si la distribución de estrellas es uniforme, el número de estrellas en una cáscara dada es proporcional al volumen de la misma, y este volumen es *proporcional al cuadrado* del radio de la cáscara. Por otra parte, las estrellas en esa cáscara se verían desde la Tierra con una luminosidad *inversamente proporcional al cuadrado* de la distancia a la que se encuentran, o sea, el radio de la cáscara. En consecuencia, el brillo de cada cáscara es el mismo, independientemente de su radio: en cáscaras cada vez más lejanas, la disminución del brillo de cada estrella se compensa exactamente por el aumento en el número de estrellas en cada cáscara. Si el Universo es infinito, el número de cáscaras esféricas en que lo podemos dividir es infinito. El brillo de cada cáscara puede ser muy pequeño, pero una cantidad pequeña sumada un número infinito de veces da una cantidad

infinita. Como consecuencia, el *brillo sumado de todas las estrellas debería ser infinito*, en contradicción con el cielo negro y estrellado que vemos de noche.

Los astrónomos partidarios de un Universo infinito propusieron diversas soluciones al problema. La más simple era suponer que el espacio interestelar no es totalmente transparente, sino que contiene materia muy difusa que absorbe parte de la luz. Se pudo demostrar que aun una pequeñísima absorción era suficiente para volver al cielo oscuro. El único inconveniente de esta solución era que, todavía a principios del siglo XX, no se había descubierto ninguna prueba observacional de que el espacio cósmico no es completamente vacío.

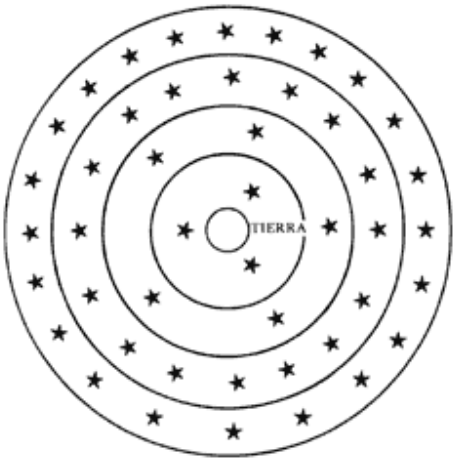

Figura 8. Paradoja de Olbers : si se divide el Universo en cáscaras concéntricas, de igual grosor y centradas en la Tierra, el brillo de cada cáscara es el mismo, y el brillo de todas las cáscaras sumadas es infinito.

Un siglo después de Newton, el filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804) decidió examinar el problema de la extensión del Universo desde el punto de vista de la filosofía. Reunió todos los argumentos en favor y en contra de un Universo sin límites y mostró que era posible, a partir de razonamientos puramente lógicos, demostrar tanto la finitud como la infinitud del Universo (la llamada antinomia de extensión(9)). Para Kant, la contradicción residía en nuestro sistema cognoscitivo, ya que existían limitaciones naturales a nuestras posibilidades de comprender el Universo.

LOS UNIVERSOS-ISLAS

Como lo sugiere su nombre, la Vía Láctea es una franja luminosa, y su aspecto debe corresponder a la forma del Universo estelar. Alrededor de 1750, un caballero inglés llamado Thomas Wright propuso un ingenioso modelo del Universo, según el cual, las estrellas estaban distribuidas más o menos

uniformemente en un plano infinito en el que se encontraba inmerso el Sol. Al mirar en una dirección perpendicular el plano, se ven sólo las estrellas más cercanas, pero en la dirección del plano se observan una infinitud de estrellas distribuidas en una franja que rodea la bóveda celeste. Ésta es justamente la apariencia de la Vía Láctea en el cielo nocturno (Figura 9).

Por una ironía de la historia, las especulaciones filosóficas de Kant sobre el Universo se volvieron obsoletas a medida que avanzaba la ciencia; (10) pero otras especulaciones suyas sobre cosmogonía, publicadas en una de sus obras de juventud, (11) habrían de volverse inmortales. Kant conocía el modelo de Wright del Universo planar y la teoría de la gravitación universal de Newton, y se dio cuenta de que eran incompatibles. El problema fundamental era mantener la estructura de la Vía Láctea sin que se colapsara sobre sí misma. Kant encontró la clave del problema en el Sistema Solar: los planetas son atraídos por el Sol, pero no caen sobre éste debido a que giran a su alrededor y la fuerza centrífuga compensa la atracción gravitacional. Del mismo modo, la Vía Láctea podría mantenerse estable si las estrellas estuvieran distribuidas, no en un plano infinito, sino en un *disco* en rotación. Las estrellas todas describirían gigantescas órbitas alrededor del centro de la Vía Láctea y su fuerza centrífuga impediría el colapso.

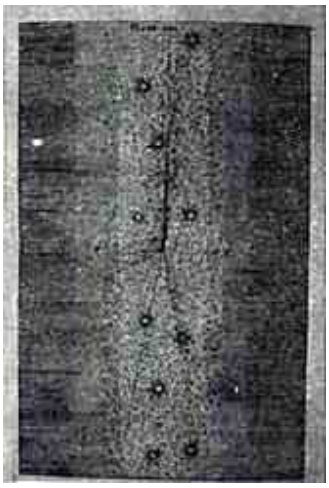

Figura 9. Modelo de la Vía Láctea, según Thomas Wright : el Sol se encuentra en el punto A. Este diagrama apareció en su libro *Una teoría original o nueva hipótesis del Universo*, 1750).

No contento con una hipótesis tan audaz, Kant dio un segundo paso aún más espectacular. Si la Vía Láctea es un conglomerado de millones de estrellas con forma de disco, ¿no podrían existir otras Vías Lácteas, semejantes a la nuestra y tan lejanas de ella como las estrellas lo son de los planetas? Tales conglomerados se verían como simples manchas luminosas debido a sus enormes distancias y sus formas serían circulares o elípticas. Y justamente tales objetos ya habían sido

observados, señaló Kant: son las llamadas estrellas *nebulosas,* o al menos una clase de ellas: manchas luminosas sólo visibles con un telescopio y cuya naturaleza era un misterio en su época.

El gran astrónomo William Herschel (1738-1822) llegó a conclusiones parecidas, pero a partir de observaciones directas. Herschel construyó lo que fue el mayor telescopio de su época, y con él estudió la configuración de la Vía Láctea. Suponiendo que la extensión de una región sideral es proporcional al número de estrellas que se ven en ella, Herschel concluyó que nuestro sistema estelar tiene una forma aplanada, de contornos irregulares (parecida a una amiba, Figura 10), y con el Sol en la región central. También descubrió Herschel numerosas nebulosas y se preguntó, al igual que Kant, si no serían lejanísimos conglomerados de estrellas. Tal parece que ésa fue su opinión, hasta que un día descubrió una nebulosa con forma de anillo y una estrella situada muy conspicuamente en su centro, asociada sin ninguna duda a la nebulosa (Figura 11); ésta no podía ser un "universo-isla", sino materia circundante de la estrella.

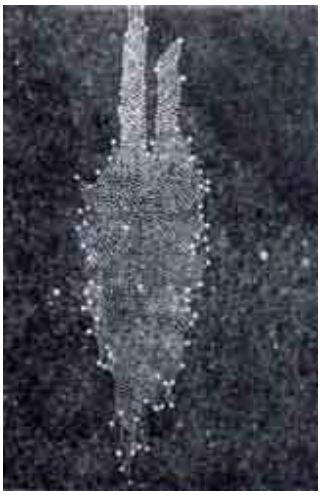

Figura 10. La forma de la Vía Láctea, según William Herschel ; el Sol se encuentra en el centro. (En *The Collected Works of Sir William Herschel*, Londres 1912.)

En el siglo XIX, el astrónomo inglés Rosse construyó un telescopio aún más potente que el usado por Herschel y estudió detalladamente las nebulosas. Se dio cuenta de que presentaban formas diversas; algunas, en particular, tenían brazos espirales y recordaban rehiletes.

Los atrónomos empezaban a sospechar que bajo el nombre genérico de nebulosas habían agrupado objetos muy distintos entre sí. ¿Son algunas nebulosas "universos-islas"? ¿Y qué son las otras? La incógnita habría de perdurar todavía un siglo después de la muerte de Kant y Herschel.

NOTAS

(1) Recordemos brevemente las tres leyes keplerianas. 1) Los planetas se mueven en elipses con el Sol en un foco. 2) El radio vector del Sol a un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. 3) El cuadrado del periodo orbital de los planetas es proporcional al cubo de sus radios orbitales.

(2) A Galileo se le presenta comúnmente como un mártir de la lucha entre la verdad y el oscurantismo religioso. En *Los sonámbulos*, Arthur Koestler sostiene una posición distinta: según él, el juicio fue el resultado de una sucesión de malentendidos, causados en parte por la vanidad de Galileo. Me parece que Koestler subestimó el papel de Galileo como uno de los fundadores de la nueva ciencia, dando demasiada importancia a sus equivocaciones, que las tuvo como todo científico, y sus pendencias con la comunidad académica de su época.

(3) Unidad astronómica: distancia de la Tierra al Sol (aproximadamente 150 millones de kilómetros).

(4) Carta a Ingoli (*Opere*, vol. VI, p, 518), citada por A. Koyré, *Del mundo cerrado al Universo infinito*.

(5) C. Huygen, *Cosmotheoros*; citado en *Theories of the Universe*, M. K. Munitz ed. (Free Press, Illinois, 1957).

(6) También inventado independientemente y casi al mismo tiempo por Leibniz, afrenta que Newton nunca le perdonó.

(7) Artículo 57 del *Sistema del mundo*, IV parte de los *Principia*.

(8) La primera medición suficientemente precisa de la distancia Tierra-Sol fue realizada por el astrónomo alemán Encke en 1824.

(9) I. Kant, *Crítica de la razón pura*.

(10) Kant no se había imaginado que el espacio no es euclidiano, como veremos en el capítulo IV. Véase también J.J. Callahan, "The Curvature of Space in a Finite Universe", *Scientific American*, p. 20, agosto de 1976.

(11) *Historia natural y universal y teoría de los cielos* (1755). El pasaje en cuestión se encuentra en Munitz, *op. cit*., p. 225

III. EL REINO DE LA NEBULOSAS

LAS DISTANCIAS ESTELARES

UN PROBLEMA fundamental de la astronomía es establecer la distancia a la que se encuentra un objeto celeste. Como vimos en el capítulo anterior, en tiempos de Newton se tenía una idea bastante correcta de las distancias interestelares, pero no se disponía de un método preciso para medirlas.

La primera determinación exitosa de la distancia a una estrella se realizó en 1838 midiendo la paralaje estelar producida por el movimiento anual de la Tierra (Figura 6). Sin embargo, este método sólo se puede aplicar a un centenar de estrellas cercanas, ya que las demás presentan paralajes demasiado pequeñas para poder ser medidas. En cuanto a las nebulosas, no exhibían ninguna paralaje visible.

Figura 11. Nebulosa de la Lira. El anillo es en realidad una cáscara de gas brillante eyectado por la estrella central.

Otro método, un poco más general, consiste en medir el movimiento aparente de las estrellas. Se ha podido determinar que el Sol se mueve con una velocidad peculiar de 20 km/seg. en exceso de velocidad promedio de sus vecinas. Debido a ello, las estrellas relativamente cercanas parecen moverse ligeramente en el cielo, con una velocidad aparente proporcional a sus distancias. Éste es el mismo efecto por el cual, desde un vehículo en movimiento, se ven los árboles cerca de la carretera pasar rápidamente, mientras que las colinas lejanas casi no parecen moverse. El método del movimiento propio permitió ampliar notablemente los horizontes astronómicos... pero las nebulosas tampoco exhibían movimientos propios.

La única manera de medir la distancia a un objeto cósmico muy lejano es determinar, de algún modo indirecto, su *luminosidad absoluta* (es decir, cuánta

energía emite en forma de luz) y compararla con su *luminosidad aparente* observada en la Tierra. La distancia se puede determinar a partir del hecho de que la luminosidad aparente disminuye como la distancia al cuadrado.

Existen muchos tipos de estrellas, desde enanas hasta gigantes, y con muy diversos brillos. Los astrónomos han aprendido a clasificarlas en diversas categorías y deducir la luminosidad absoluta de cada tipo. Esto se logró gracias a una importantísima técnica llamada *espectroscopia*.

El principio de la espectroscopia es el hecho de que la luz es una onda electromagnética. Los colores que percibimos corresponden a distintas longitudes de onda: (1) por ejemplo, la luz roja tiene una longitud de onda de unos 7/10 000 de milímetro y la azul de 4/10 000 (Figura 12).(2) En la luz que nos llega del Sol, todos los colores vienen mezclados, pero cuando los rayos solares pasan a través de gotas de agua, los colores se separan y se forma el arco iris: una sucesión de colores de acuerdo con la longitud de onda que les corresponde. El mismo fenómeno puede producirse en un laboratorio al hacer pasar un rayo luminoso, emitido por cualquier gas incandescente, a través de un prisma (un pedazo de vidrio pulido) y formar así lo que se llama el *espectro* de la luz (Figura 13). Si se analiza detalladamente el espectro así obtenido se puede advertir un conjunto de líneas, sobrepuestas a los colores, que son producidas por los átomos del material que emite luz. Cada elemento químico posee un conjunto de líneas que corresponden a longitudes de onda bien definidas y que, por lo tanto, aparecen siempre en la misma posición en el espectro; gracias a estas líneas, se puede determinar la composición química de un gas estudiando la luz que emite.

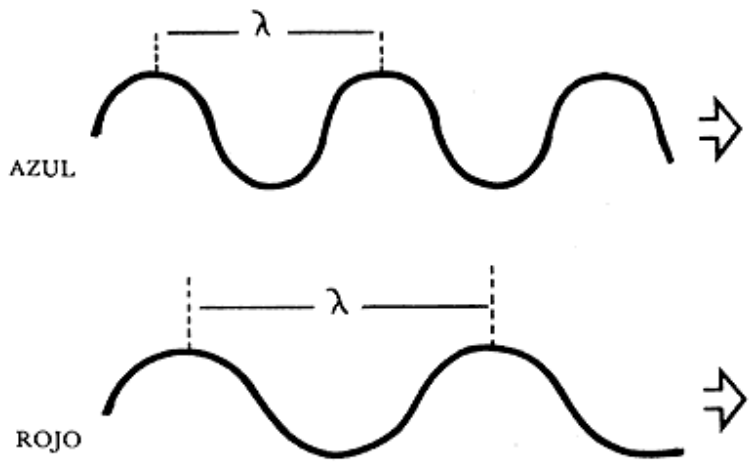

Figura 12. La luz es una onda electromagnética. La longitud de la onda A. Determina el color (véase también la figura 34).

La espectroscopia —estudio de los espectros— nació a mediados del siglo XIX, e, inmediatamente, fue utilizada por los astrónomos para estudiar las estrellas.

Haciendo pasar la luz estelar, magnificada por un telescopio, a través de un prisma, pudieron realizar el análisis químico de los astros sin tener que ir hasta ellos. Los elementos que se descubrieron en los cielos no diferían de los que se encuentran en la Tierra: el último vestigio de la física aristótelica había sido refutado.(3)

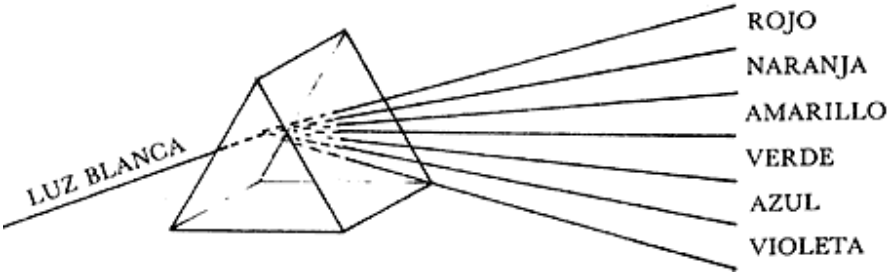

Figura 13. Al pasar por un prisma, la luz blanca se descompone en los colores que la forman. El efecto se debe a que las ondas luminosas emergen del prisma en direcciones ligeramente distintas que dependen de la longitud de cada onda.

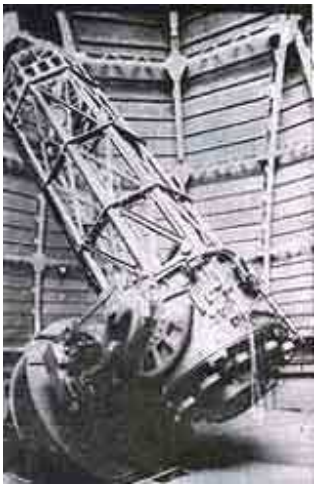

Figura 14. Telescopio de 1.50 m del Observatorio de Monte Wilson. Hubble trabajó principalmente con él.

Los espectros estelares presentan una amplia variedad de tipos. Poco a poco, los astrónomos aprendieron a clasificar las estrellas según sus espectros y se dieron cuenta de que cada tipo espectral corresponde a propiedades físicas bien determinadas. En particular, fue posible determinar la luminosidad absoluta de muchas estrellas a partir de sus tipos espectrales. Esto permitió medir distancias astronómicas cuando los métodos del paralaje o del movimiento propio resultaban insuficientes.

También se descubrió que algunas estrellas, como las llamadas *cefeidas* (por **d** del Cefeo, el prototipo de ellas), variaban su brillo en forma cíclica. Más aún, los astrónomos se dieron cuenta de que el tiempo que tarda cada ciclo, llamado periodo, estaba relacionado en forma precisa con la luminosidad absoluta de la estrella. Este descubrimiento ha sido de fundamental importancia para determinar las distancias cósmicas, ya que se pueden detectar cefeidas muy lejanas y, midiendo la duración de su ciclo, deducir directamente su luminosidad absoluta.

EL TAMAÑO DE LA VÍA LÁCTEA

A principios del siglo XX, el astrónomo holandés Jacob Kapteyn calculó las dimensiones de la Vía Láctea a partir de las distancias estelares determinadas por el método del movimiento aparente. Llegó a la conclusión de que nuestro sistema de estrellas tenía la forma de un disco grueso de unos 30 000 años luz de diámetro y 6 000 años luz de espesor, con el Sol cerca del centro. Sin embargo, Kapteyn había supuesto que el espacio interestelar estaba totalmente vacío. Si existiera polvo o gas en el espacio sideral, la luz estelar sería atenuada y las estrellas más lejanas no serían visibles; en consecuencia, el tamaño de la Vía Láctea podía ser mayor que el calculado por Kapteyn.

En esa misma época tuvo lugar un acontecimiento de crucial importancia en la historia de la cosmología: empezó a funcionar el observatorio del monte Wilson, en la Alta California. En 1908 contaba con el que era en ese momento el telescopio más grande del mundo: un reflector con un espejo de un metro y medio de diámetro (Figura 14). Unos diez años después se instaló allí mismo un telescopio aún mayor, con un espejo de dos metros y medio de diámetro (Figura 15).

Figura 15. Telescopio de 2.50 m del Observatorio de Monte Wilson.

Figura 16. Cúmulo globular en la constelación de Hércules.

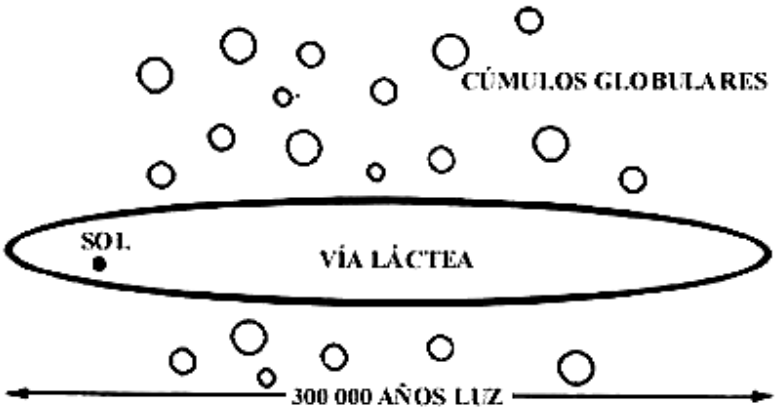

Figura 17. Modelo del Universo según Shapley.

Alrededor de 1915, el astrónomo Harlow Shapley, que trabajaba en Monte Wilson, encontró una nueva manera de tomarle las medidas a la Vía Láctea. Utilizó como indicadores de distancia unos objetos celestes llamados *cúmulos globulares*, que son conglomerados, esféricos y muy compactos, de miles de estrellas (Figura 16), y cuya naturaleza había sido descubierta por medio de técnicas fotográficas. Shapley logró identificar estrellas variables, cefeidas y de otros tipos, en los cúmulos globulares, con lo que pudo determinar sus distancias. Resultaron ser objetos extremadamente lejanos: aun los más cercanos se encontraban a 30 000 años luz de distancia, más allá de las fronteras del universo de Kapteyn. Además, según las mediciones de Shapley, los cúmulos estaban distribuidos en una especie de esfera aplanada, o elipsoide, cuyo plano central coincidía con la Vía Láctea: pero, curiosamente, se veían muchos más cúmulos en una dirección del cielo que en otra. Para Shapley, la explicación de este hecho era que los cúmulos globulares estaban distribuidos alrededor de la Vía Láctea, y la asimetría aparente de su distribución se debía a que el Sol no estaba en el centro de la Vía Láctea, sino cerca de un borde. La otra implicación importante de esta hipótesis era que

nuestro sistema estelar medía más de 300 000 años luz de diámetro, diez veces más de lo que había calculado Kapteyn. A Shapley se le ha llamado el Copérnico moderno, por quitarle al Sol la última posición privilegiada que conservaba: la de ser el centro de la Vía Láctea.

Figura 18. Una nebulosa espiral.

Figura 19. La nebulosa de Andrómeda.

Por esas épocas, ya se había confirmado que algunas nebulosas eran nubes de gas relativamente cercanas, pero aquellas con formas espirales ¿eran universos-islas? (Figura 18). En 1917, el astrónomo Ritchey tomó una serie de fotografías de la nebulosa **NGC** 6946 desde Monte Wilson y encontró en una de ellas un punto brillante que no se veía en las anteriores. Ritchey dedujo que se trataba de una *nova*: una estrella que aumenta repentinamente de brillo. El asunto interesó a su colega H. D. Curtis, quien logró encontrar varias estrellas más en distintas nebulosas espirales que parecían ser novas. Comparando el brillo de estas novas con el de una típica nova en la vecindad del Sol, se deducían distancias para las nebulosas que variaban entre medio millón y diez millones de años luz. En particular, la nebulosa de Andrómeda (Figura 19) resultaba ser nuestra "vecina", a

medio millón de años luz; y a esa distancia, su tamaño real debía de ser de unos 30 000 años luz: ¡el mismo tamaño que Kapteyn había deducido para la Vía Láctea!

Por una ironía de la historia, Shapley se negó a aceptar que algunas nebulosas podían ser universos-islas semejantes al nuestro, porque el tamaño de la Vía Láctea que él había deducido era mucho mayor que el de éstas. Por otra parte, Curtis sostenía que el tamaño típico de algunas nebulosas era comparable al tamaño de la Vía Láctea que Kapteyn había calculado.

Figura 20. Edwin P. Hubble.

Figura 21. Placa de M31 (nebulosa de Andrómeda) en la que Hubble descubrió una cefeida (marcada VAR).

La solución al problema se encontró alrededor de 1930 cuando el astrónomo suizo Robert J. Trumpler demostró definitivamente que existe polvo oscuro en el plano de la Vía Láctea. Las estrellas localizadas cerca del plano se ven menos luminosas de lo que son porque su luz es parcialmente absorbida por el polvo. Había por lo tanto, que revisar todas las mediciones anteriores de distancias, incluyendo las de novas y cefeidas.

En particular, se encontró que el tamaño de la Vía Láctea es tres veces mayor que el propuesto por Kapteyn y unas tres veces menor que el calculado por Shapley; el conglomerado de cúmulos globulares resultó tener forma esférica y no elipsoidal, como había supuesto este último. Pero, para entonces, la verdadera naturaleza de las nebulosas había sido por fin elucidada.

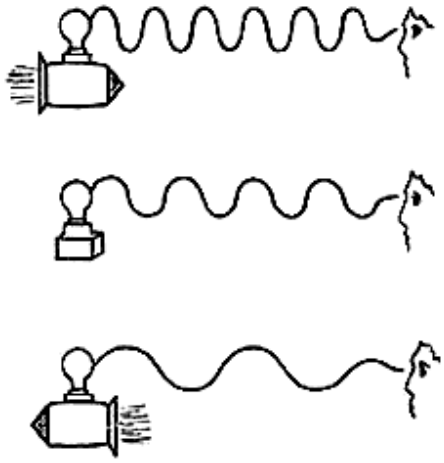

Figura 22. El efecto Doppler: la longitud de una onda se recibe aumentada o disminuida según si la fuente emisora se aleja o se acerca.

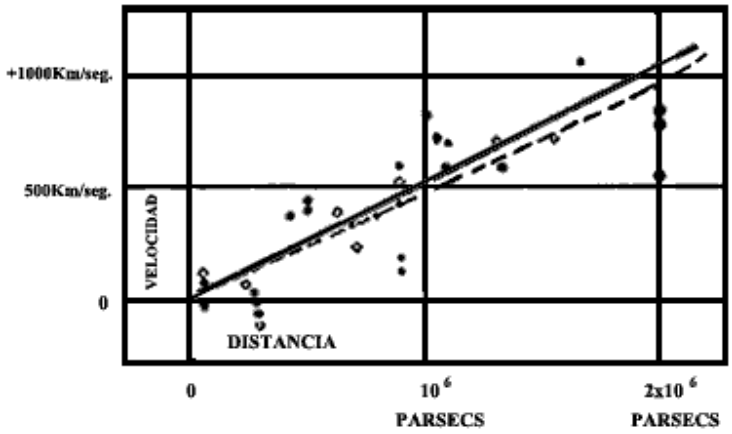

Figura 23. Relación entre la velocidad y la distancia de una galaxia, tomada del libro de Hubble: *El reino de las nebulosas*. Yale University, 1936. Las observaciones modernas cubren un rango cien veces mayor y confirman el descubrimiento original.

LAS OBSERVACIONES DE HUBBLE

Edwin P. Hubble (Figura 20) nació en Missouri, Estados Unidos, en 1889. Después de practicar boxeo prefesional, estudiar abogacía y ejercer brevemente esta última profesión, decidió dedicarse a la astronomía. Terminada la primera

Guerra Mundial, en la que participó enrolado en el ejército de su país, empezó a trabajar en el observatorio de Monte Wilson. Allí, se dedicó a estudiar las nebulosas y pronto pudo demostrar que algunas de ellas estaban constituidas por innumerables estrellas. En 1923, logró identificar una estrella cefeida en los bordes externos de la nebulosa de Andrómeda (Figura 21); midiendo su periodo, dedujo su luminosidad absoluta y pudo establecer que esa nebulosa se encuentra a la enorme distancia de un millón de años luz. No había duda de que se trataba de un universo-isla o, en lenguaje más moderno, de una galaxia.

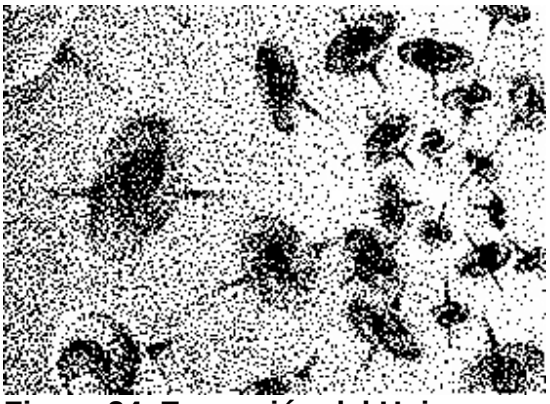

Figura 24. Expansión del Universo.

Posteriormente Hubble descubrió más cefeidas en otras nebulosas y obtuvo valores semejantes para sus distancias. Sus descubrimientos eran tan inesperados que no toda la comunidad astronómica los aceptó desde un principio, pero alrededor de 1930 ya casi nadie dudaba de la validez de sus mediciones.

Hubble ideó diversos métodos para medir la distancia a galaxias cada vez más lejanas, en las que no era posible distinguir cefeidas. Notó que en las galaxias cercanas, cuyas distancias ya había determinado, las estrellas más brillantes tenían todas aproximadamente el mismo brillo. Hubble midió la luminosidad de las estrellas más brillantes en las galaxias lejanas y, suponiendo el mismo brillo para todas ellas, dedujo sus distancias. Para las galaxias todavía más lejanas, en las que es imposible distinguir una estrella aislada, Hubble ideó otro método: noto que las galaxias tienden a agruparse en cúmulos de galaxias, y que en cada cúmulo hay al menos una galaxia gigante de forma elíptica y de luminosidad bien definida. Buscando gigantes elípticas y midiendo sus brillos, pudo determinar también sus distancias. La imagen del Universo que resultó rebasaba todo lo imaginable en esa época: las galaxias se extendían por millones de años luz y su número parecía no tener límite. Pero las sorpresas no se habían acabado.

Como mencionamos anteriormente, los astrónomos pueden estudiar la composición de una estrella haciendo pasar su luz por un prisma para exhibir su espectro. Como vimos al principio de este capítulo, cada elemento químico se identifica por un conjunto de líneas que aparecen en posiciones bien definidas del espectro y que corresponden a ciertas longitudes de onda. Pero cuando una fuente de luz se aleja, sus líneas espectrales aparecen dezplazadas hacia el lado

rojo del espectro, o sea el lado de las longitudes de onda más largas; del mismo modo, si la fuente se acerca, sus líneas espectrales se desplazan hacia el lado violeta. El desplazamiento es proporcional a la velocidad de la fuente luminosa: este fenómeno se llama *efecto Doppler* (Figura 22). El mismo fenómeno sucede con las ondas sonoras: cuando una ambulancia se acerca, el sonido de su sirena se oye más agudo y cuando se aleja más grave: la razón es que las ondas sonoras se reciben con una longitud menor en el primer caso y una mayor en el segundo.

Varios astrónomos, entre los cuales se destacan el mismo Hubble y su colaborador Humason, habían descubierto que los espectros de las nebulosas espirales presentaban corrimientos al rojo como si se alejaran de nosotros a enormes velocidades cientos de kilómetros por segundo—. Alrededor de 1930, Hubble tuvo la idea de comparar las velocidades de las nebulosas con sus distancias y descubrió una correlación notable: la velocidad de recesión era proporcional a la distancia. Más precisamente, encontró que si V es la velocidad y D la distancia de una galaxia, se cumple la relación

V = *H X D,*

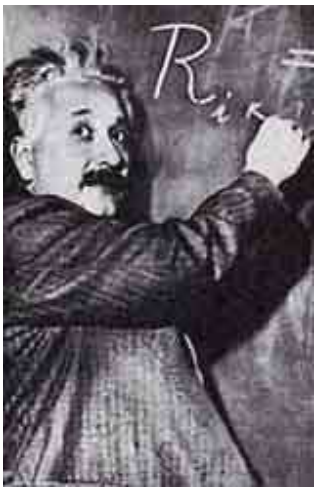

Figura 25. Albert Einstein.

donde H es una constante que ahora llamamos *constante de Hubble* (Figura 23).

Así, todas las galaxias se alejan de nosotros, y más rápidamente mientras más lejos se encuentran. ¿Acaso nuestra propia galaxia ahuyenta a las demás?: evidentemente no, lo que este fenómeno implica es que *el Universo está en expansión*.

Expliquemos esto con un ejemplo: supongamos que un pastel de pasas se infla uniformemente. La distancia entre cada pasa irá aumentando y un observador que se encuentre en cierta pasa verá a las demás alejarse de él (suponiendo que el pastel es transparente) con una velocidad que aumenta con la distancia. Este

efecto se verá desde cualquier pasa y nuestro observador no podrá deducir que la suya es privilegiada. El Universo es análogo a ese pastel, con galaxias en lugar de pasas (Figura 24). Nos encontramos ante la culminación de la revolución copernicana: ni la Tierra, ni el Sol y ni siquiera nuestra galaxia pueden aspirar a ser centros del Universo.

Hubble encontró que la velocidad de recesión de las galaxias era aproximadamente de 60 km/seg. por cada millón de años luz de distancia. Actualmente, se cree que el valor correcto está entre 15 y 30 km/seg. por millón de años luz. Esta rectificación se hizo en los años cincuentas, cuando se descubrió que existen dos tipos de cefeidas con relaciones periodo-luminosidad algo distintas; también resultó que Hubble había confundido grandes nubes luminosas en algunas galaxias con sus estrellas más brillantes. En consecuencia, la escala corregida del Universo resultó ser más del doble de la que encontró originalmente Hubble.

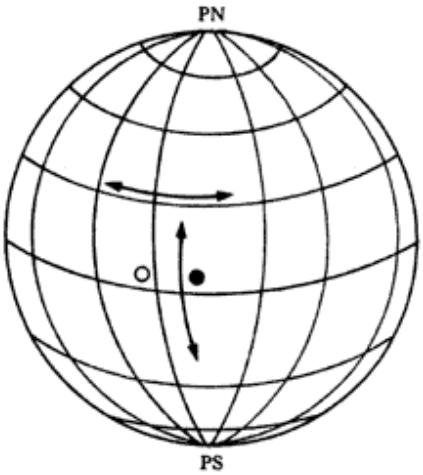

Figura 26. La longitud y la latitud son dos coordenadas con las que se puede localizar cualquier punto sobre la superficie terrestre.

La implicación más importante de que el Universo está en expansión es que, alguna vez en el remoto pasado, toda la materia debió estar comprimida infinitamente. A partir de la velocidad de expansión, es fácil determinar que ésa fue la situación hace unos *15 mil millones de años*. El Universo tuvo un nacimiento; en el lenguaje científico moderno, se ha llamado a ese suceso la *Gran Explosión*.

Empero, era necesaria una revolución en la física para poder entender e interpretar estos descubrimientos. Afortunadamente, esa revolución se dio mientras Hubble realizaba sus observaciones.

NOTAS

(1) La longitud de onda es la distancia entre dos crestas (o dos valles) de una onda.

(2) La longitud de onda se denota comúnmente con la letra A. La *frecuencia*, v, es el número de vibraciones de la onda en un segundo y es inversamente proporcional a la longitud de onda. La fórmula que relaciona estos dos conceptos es: v = c/A, donde c es la velocidad de la luz.

(3) Curiosamente, en la misma época en que la espectroscopia conquistaba las estrellas, Augusto Comte enseñaba la filosofía positivista, una de cuyas premisas era que sólo podía conocerse la naturaleza a través de métodos empíricos. El ejemplo favorito de los filósofos positivistas era la naturaleza de las estrellas: dado que no se podía alcanzar una estrella, era absurdo tratar de entender de qué está hecha.

IV. EL ESPACIO-TIEMPO CURVO

SI BIEN la mecánica de Newton es el fundamento de la física clásica, deja de ser válida en circunstancias que desbordan el marco de la experiencia cotidiana; en particular, cuando se consideran velocidades cercanas a la de la luz. La misma teoría electromagnética, desarrollada por James C. Maxwell en el siglo pasado, no encajaba en la física newtoniana, por lo que, al empezar el siglo XX, se hizo necesaria una reformulación de la física.

Fue así como, en 1905, Albert Einstein (Figura 25) formuló la *Teoría de la Relatividad Especial*, que vino a revolucionar todas nuestras concepciones científicas y filosóficas. Aunque tardó varios años en ser reconocida por los demás científicos, esta teoría es actualmente uno de los pilares más sólidos de la física moderna.

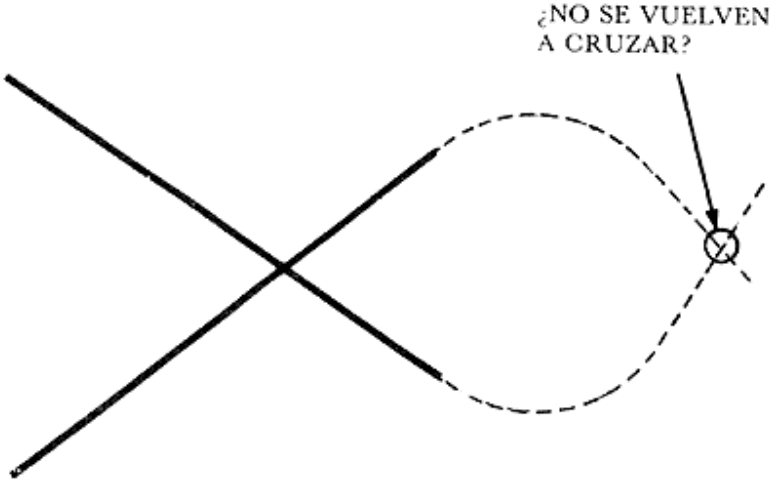

Figura 27. Según la geometría clásica, dos rectas que se cruzan en un punto no vuelven a cruzarse.

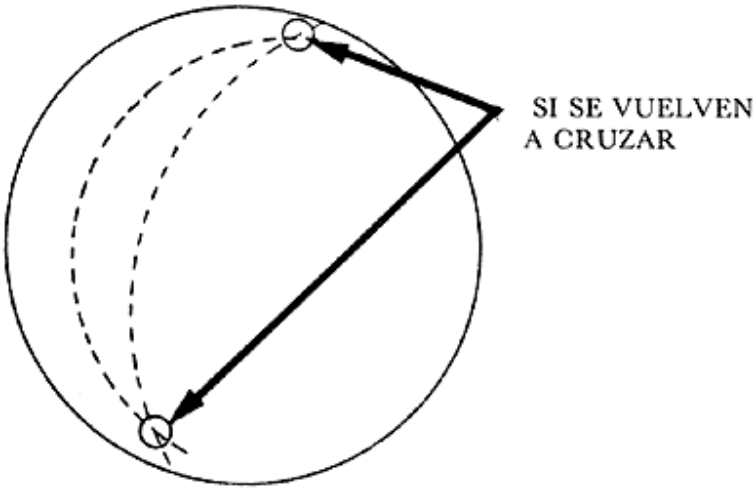

Figura 28. Pero dos "rectas" sí se cruzan sobre una superficie curva.

En la Relatividad Especial, el espacio y el tiempo no son dos categorías independientes, como en la física newtoniana. Por el contrario, el mundo en el que vivimos se concibe como un espacio de *cuatro* dimensiones: tres del espacio común, más el tiempo interpretado como una cuarta dimensión. En la teoría de Einstein, no existe un tiempo absoluto, sino que el tiempo depende del movimiento de quien lo mide. Otro efecto inesperado, predicho por esta teoría, es que la velocidad de la luz es la misma con respecto a cualquier observador, independientemente de la velocidad con que éste se mueva; la velocidad de la luz —designada comúnmente por la letra *c*— es una constante fundamental de la naturaleza.(1) Einstein también predijo una equivalencia entre la masa y la energía tal que, bajo condiciones apropiadas, una puede transformarse en la otra según la famosa fórmula:

$$E = mc^2$$

(*E*: energía, *m*: masa). Lo cual se confirmó en forma dramática años después.

Las fuerzas electromagnéticas se podían describir de una manera muy natural con el formalismo de la teoría de Einstein, hecha a la medida para ellas, pero la fuerza gravitacional seguía eludiendo toda descripción relativista. La teoría de la gravitación de Newton funciona perfectamente para objetos con velocidades pequeñas con respecto a la luz, pero no toma en cuenta la acción de la gravedad sobre la luz misma. Dicha acción es imperceptible en nuestra experiencia cotidiana, pero no siempre es despreciable en el Universo (el ejemplo más espectacular es el de los hoyos negros, que son cuerpos cuya intensísima atracción gravitacional no deja escapar la luz). Y dado que la trayectoria de un rayo luminoso parece un ejemplo natural de "línea recta", es de esperarse que un campo gravitacional intenso altere muy peculiarmente nuestras concepciones geométricas.

En 1915, Albert Einstein formuló la teoría de la *Relatividad General*, así llamada porque generalizó la Teoría Especial para incluir los efectos de la gravitación. Con esta teoría sacudió nuevamente los fundamentos de la física clásica. Según el postulado más revolucionario de la Relatividad General, el espacio en el que vivimos es *curvo* y la gravitación es la manifestación de esta curvatura.

Un ejemplo de espacio curvo es la superficie de la Tierra; es un espacio de *dos* dimensiones, en el sentido de que la posición de un punto en él se describe por medio de dos coordenadas: la longitud y la latitud (Figura 26). Para comprender las implicaciones geométricas de la curvatura, imaginemos un geómetra que decide comprobar en la práctica algunos de los postulados fundamentales de la geometría clásica: por ejemplo, el de que dos rectas que se cruzan en un punto no se vuelven a cruzar (Figura 27). Supongamos que, para ello, se pasa días y

noches trazando rectas sobre el papel, tratando de encontrar un par de ellas que se crucen en dos o más puntos. La búsqueda resulta vana, pero, lejos de darse por vencido, el geómetra decide hacer sus comprobaciones a gran escala, trazando rectas de varios miles de kilómetros. El primer problema al que se enfrenta es el de precisar el concepto de "recta" a una escala tan grande. Siendo la Tierra redonda, una "recta" trazada sobre su superficie necesariamente es una curva y ese efecto se hace notable mientras más grandes son los tamaños considerados. Pero el problema tiene una solución muy simple: se define una "recta" como la distancia más corta entre dos puntos. Volviendo a nuestro geómetra, supongamos que traza dos "rectas" de varios miles de kilómetros que originalmente se cruzan en un punto. Esas dos rectas son en realidad segmentos de círculos y se volverán a cruzar en el otro lado de la Tierra (Figura 28). Lo mismo sucederá con otros postulados de la geometría clásica (por un punto dado sólo pasa una recta paralela a otra recta dada; dos rectas paralelas entre sí nunca se cruzan; los tres ángulos de un triángulo suman siempre 180 grados; etc.). Estos postulados son válidos a escalas pequeñas, pero nuestro geómetra comprobará que dejan de aplicarse a escalas comparables con el diámetro de la Tierra. De hecho, el geómetra habrá descubierto la curvatura de la Tierra.

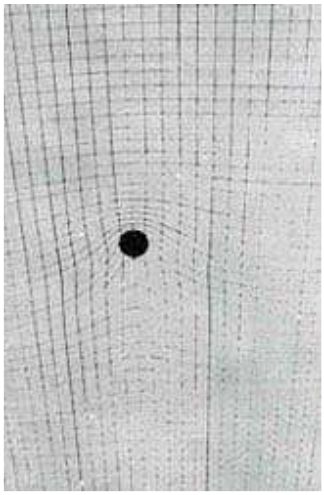

Figura 29. Un cuerpo masivo deforma el espacio-tiempo a su alrededor.

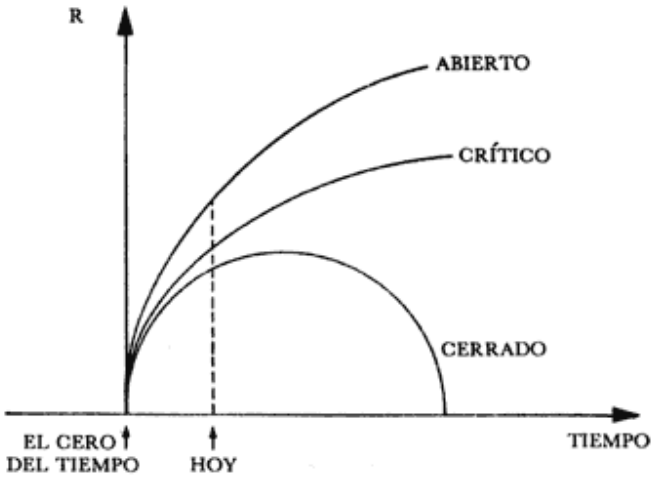

Figura 30. La evolución del factor de escala R (la distancia entre dos galaxias) en función del tiempo, según las tres posibilidades descubiertas por Friedmann.

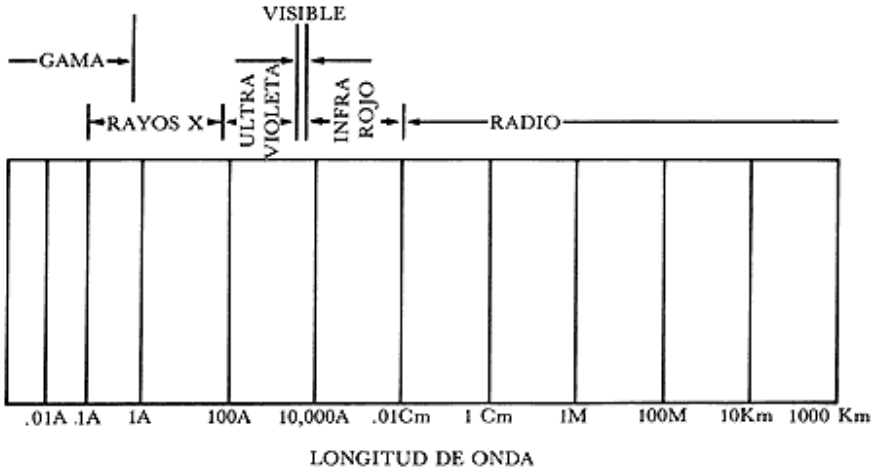

Figura 31. El espectro electromagnético. La luz corresponde a un pequeño rango de frecuencias (A = Angstrom = 10^{-8} cm).

Supongamos ahora que nuestro imaginario geómetra, provisto de una nave espacial, decide continuar sus experimentos en el Sistema Solar. Puede utilizar como rectas los haces luminosos de un láser. Encontrará que los postulados de la geometría clásica dejan de aplicarse otra vez, aunque, en este caso, la desviación será mínima y sólo podrá ser descubierta por mediciones extremadamente precisas.

Pero si el geómetra encuentra la manera de proseguir sus experimentos a escalas cada vez mas grandes, hasta cubrir el Universo mismo, comprobará que los postulados de la geometría clásica dejan de aplicarse cada vez más drásticamente: las rectas se cruzan en más de un punto, las paralelas se unen o

separan, la suma de los ángulos de un triángulo de dimensiones cósmicas no da 180 grados, etc. En resumen, habrá descubierto la *curvatura del Universo*.

Einstein descubrió que el Universo es curvo, pero, a diferencia del hipotético geómetra, llegó a esa conclusión por medio de razonamientos lógicos combinados con experiencias físicas. Más aún, la causa de la curvatura es la masa, y la curvatura del espacio se manifiesta como fuerza gravitacional. Además, la masa de los cuerpos no sólo deforma el espacio sino también el tiempo: cerca de un cuerpo muy masivo el tiempo transcurre más lentamente.

Si el Sol atrae a los planetas, es porque deforma el espacio-tiempo a su alrededor y los planetas se mueven siguiendo esa curvatura, al igual que una canica que se mueve sobre una superficie curvada (Figura 29). Pero si bien es fácil visualizar la curvatura de la superficie terrestre o cualquier otra superficie contenida en el espacio "común" de tres dimensiones, la curvatura del espacio-tiempo *no* puede visualizarse como si estuviera contenida en un espacio más amplio de cinco o más dimensiones.

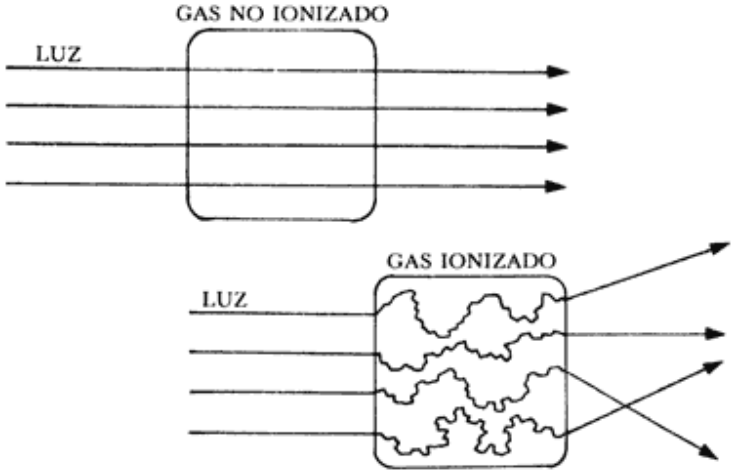

Figura 32. Un gas no ionizado suele ser transparente, pero al ionizarse, los electrones libres desvían constantemente las trayectorias de los fotones, por lo que se pierde la transparencia.

Afortunadamente, un espacio de cualquier número de dimensiones, aunque escape a nuestra experiencia e intuición, puede estudiarse por medio de fórmulas matemáticas. En el siglo XIX, matemáticos como Riemann y Lobashevski elaboraron nuevas geometrías, perfectamente autoconsistentes, pero que no satisfacían algunos de los postulados de la geometría clásica. En particular, Riemann desarrolló un formalismo matemático que permitió estudiar espacios curvos con cualquier número de dimensiones.

Durante varias décadas, la geometría riemanniana fue considerada como una simple especulación matemática, sin conexión con la realidad, hasta que Einstein

vio en ella la herramienta matemática necesaria para su teoría de la gravitación. Con la teoría de la Relatividad General, el espacio y el tiempo dejaron de ser simples escenarios de los fenómenos naturales, para transformarse en participantes dinámicos.

La curvatura del espacio-tiempo es un efecto casi imperceptible en nuestro sistema planetario; esto no es de extrañarse, pues la fuerza de la gravitación es extremadamente débil comparada con otras fuerzas de la naturaleza (basta recordar que, al levantar una piedra, nuestros músculos vencen la atracción gravitacional de toda la Tierra). Pero la magnitud sorprendente de la curvatura del espacio-tiempo se hará evidente a la escala del Universo mismo.(2)

El primer estudio teórico del Universo dentro del marco de la Relatividad General se debe al mismo Einstein y data de 1917. Einstein partió de dos suposiciones básicas: el Universo es homogéneo e isótropo. Por homogeneidad se endiende que la materia en el Universo está distribuida, *a gran escala*, en forma uniforme —tal como el gas en un recipiente, que se compone de moléculas, sólo que en el caso del Universo las moléculas serían los cúmulos de galaxias—. Y por isotropía, que la apariencia del Universo, también a gran escala, es la misma en todas las direcciones. Estas dos suposiciones han sido confirmadas por las observaciones astronómicas (volveremos a ellas en los próximos capítulos).

Einstein propuso un modelo cosmológico según el cual el Universo era finito, pero sin fronteras. Esta concepción aparentemente contradictoria se aclara si recordamos que el espacio es curvo; así como la superficie de la Tierra es finita, pero sin bordes, del mismo modo el universo de Einstein puede cerrarse sobre sí mismo y no tener fronteras. En el modelo propuesto por Einstein, una nave espacial que viaje siempre en la misma dirección regresará a su punto de partida después de atravesar todo el Universo, como un Magallanes cósmico.

Todavía no se había descubierto la expansión cósmica en 1917, por lo que Einstein supuso también que el Universo es estático, o sea, que no cambia con el tiempo. Pero las ecuaciones de la Relatividad General indicaban que el Universo no podía mantenerse estático, sino que se colapsaría sobre sí mismo debido a su propia atracción gravitacional —tal como había previsto Newton—. La única solución que encontró Einstein fue introducir en sus fórmulas una pequeña modificación que permitía a la fuerza gravitacional volverse repulsiva a distancias cósmicas, y evitar así el colapso del Universo.

Poco después, alrededor de 1922, el físico ruso A. A. Friedmann estudió más detalladamente las ecuaciones de Einstein, sin la modificación introducida por éste, y llegó a la conclusión de que el Universo no podía permanecer inmóvil, sino que debía encontrarse en proceso de expansión. Dependiendo de la densidad de materia en el Universo, la expansión seguirá, ya sea indefinidamente o hasta un momento en que se detenga y empiece una contracción (Figura 30). Al principio,

los trabajos de Friedmann no fueron tomados en serio, pero cuando Hubble descubrió la expansión cósmica, los físicos y astrónomos se dieron cuenta de que dicho efecto había sido predicho teóricamente (Friedmann murió de tifoidea en 1925 sin ver la confirmación de su obra).

Independientemente de Friedmann, el abad belga Georges Lemaitre estudió las ecuaciones de Einstein por su cuenta, pero incluyendo la repulsión cósmica, y llegó a conclusiones semejantes a las del físico ruso. Lemaitre demostró que el Universo estático de Einstein era inestable, en el sentido de que cualquier pequeña perturbación provocaría una expansión o contracción que no se detendría nunca. Basado en sus cálculos, Lemaitre formuló la hipótesis de que el Universo se encontraba originalmente en un estado de compresión tal que toda la materia formaba un solo y único núcleo atómico, que llenaba todo el espacio cósmico disponible: el *átomo primordial.* Como esa configuración era inestable, en algún momento el Universo empezó a expanderse; el átomo primordial se rompió en innumerables pedazos a partir de los cuales se formaron todos los elementos químicos en el Universo. A gran escala, la, expansión del Universo se desarrolló esencialmente como en el modelo de Friedmann; a escala más pequeña, algunas regiones del átomo primordial se expandieron más lentamente que otras, hasta detenerse y empezar a contraerse en algún momento para formar las galaxias.

Figura 33. La nebulosa de Orión. Es una gigantesca nube de gas ionizado, visible gracias a la luz de las estrellas de su interior.

En 1946, el físico Georges Gamow propuso que el Universo no sólo se encontraba inicialmente a muy altas densidades, sino también a temperaturas extremadamente altas. Poco después de iniciarse la expansión, la materia era una mezcla homogénea de partículas elementales: electrones, fotones, protones, neutrones, neutrinos, etc. Inicialmente, la temperatura era prácticamente infinita, pero, a medida que se expandía el Universo, la materia se fue enfriando; cuando la temperatura bajó a unos mil millones de grados Kelvin, las condiciones fueron propicias para la creación de los elementos químicos que componen el Universo.

En los próximos capítulos, estudiaremos con más detalle la teoría de la Gran Explosión.

NOTAS

(1) c = 299 792 kilómetros por segundo o redondeando: *c* = 300 000 km/seg.

(2) O cerca de objetos masivos extremadamente densos, como las estrellas de neutrones o los hoyos negros.

V. EL MUNDO DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

EL MUNDO SUBATÓMICO

PARA poder describir el estado del Universo en su "infancia" según las teorías más recientes, tendremos que recurrir a los conocimientos modernos sobre los constituyentes más pequeños de la materia. En este capítulo, abriremos un paréntesis y cambiaremos de escala: del Universo en su conjunto al mundo microscópico de las partículas elementales.

La materia está constituida por átomos. A pesar de lo que indica su nombre, un átomo no es indivisible: consta de un *núcleo*, alrededor del cual "giran" *electrones*. Los electrones son partículas con una carga eléctrica negativa y una masa de **9 [X 10^{-28}]** gramos. A su vez, los núcleos atómicos están constituidos por dos tipos de partículas: los *protones* (de carga positiva igual en magnitud a la del *electrón)* y los *neutrones* (sin carga); estas dos partículas tienen masas muy parecidas: respectivamente unas 1836 y 1838 veces la masa del electrón. El número de protones en un núcleo atómico determina el tipo de elemento químico: el núcleo de hidrógeno consta únicamente de un protón, el de helio de dos protones y dos neutrones, y así sucesivamente; el último elemento que se encuentra en estado natural, el uranio, posee 92 protones y 164 neutrones.

Uno de los descubrimientos más notables de la física moderna es que las partículas elementales tienen propiedades de partícula y de onda al mismo tiempo. Esta dualidad es la base de la llamada *mecánica cuántica* y tiene profundísimas repercusiones físicas y hasta filosóficas, pero no es éste el lugar para analizarla. Nos conformaremos con señalar un ejemplo ilustrativo: la luz, que se comporta como una onda, está constituida por una partícula elemental, el *fotón*. Esta partícula se mueve siempre a la velocidad de la luz (evidentemente), y no posee masa aunque sí energía. El fotón puede interpretarse como un paquete de energía pura; la frecuencia (v) de una onda luminosa está relacionada con la energía (E) de los fotones que la componen a través de la fórmula de Planck:

$$E = h\,v$$

donde h es la constante de Planck —una de las constantes fundamentales de la naturaleza—. La energía del fotón determina el color de la luz; por ejemplo, los fotones de la luz roja tienen menos energía que los de la luz violeta. Pero no toda la luz puede ser percibida por nuestros ojos; la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma están constituidos por fotones de mucha energía, mientras que los de poca energía constituyen la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio (Figura 31).

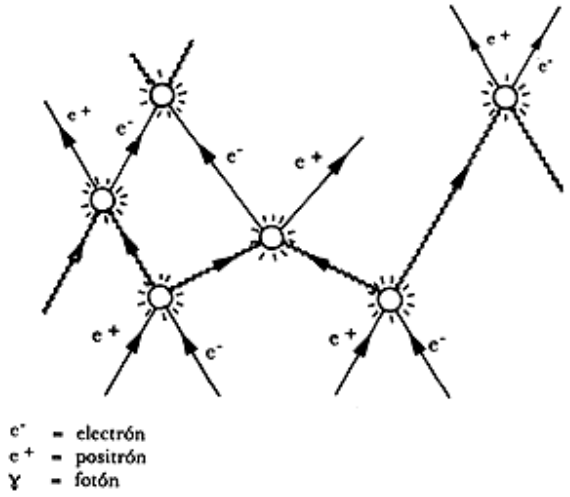

Figura 34. A temperaturas superiores a los 5 000 millones de grados los fotones, electrones y positrones chocan constantemente entre sí, créandose y aniquilandose.

Al principio, los físicos pensaban que los electrones, protones, neutrones y fotones eran las partículas fundamentales de las que está constituido todo el Universo. Desgraciadamente, la naturaleza resultó ser mucho más complicada. Poco a poco, se fueron descubriendo nuevas partículas, con propiedades muy diversas, y parecía que la naturaleza había creado una enorme variedad de ellas únicamente para dificultar el trabajo de los físicos, pues ninguna de las nuevas partículas parecía tener una utilidad. Casi todas las partículas elementales son inestables: se transforman unas en otras hasta terminar finalmente como electrones y protones, (1) los cuales son estables afortunadamente (hasta donde se sabe).

Con el ánimo de poner un poco de orden en el "zoológico" de las partículas elementales, algunos físicos propusieron, a mediados de los sesentas, que las partículas elementales pesadas, como el protón y neutrón, no son en realidad elementales sino que están constituidas a su vez por partículas aún más elementales: los *cuarks*. Todavía no se ha podido detectar un cuark aislado, y probablemente nunca se pueda, pero se han encontrado recientemente pruebas indirectas de su existencia. Originalmente, se habían propuesto tres tipos de cuarks para construir las partículas elementales, ¡pero hasta el momento el número ha aumentado a nueve!

De todas las partículas elementales "exóticas", vale la pena mencionar el *neutrino*. Al igual que el fotón, su masa es nula (o quizá muy pequeña, menor que la del electrón) y se mueve a la misma velocidad que la luz. Participa en reacciones nucleares, como el llamado decaimiento beta, por el que un neutrón se transforma en un protón, un electrón y un neutrino. La interacción del neutrino con las otras partículas es extremadamente débil; siendo inmune a las fuerzas

electromagnéticas que producen la cohesión de la materia, puede cruzar un cuerpo sólido sin detenerse (de 10^{13} neutrinos que atraviesen la Tierra, apenas uno, en promedio, será absorbido). El neutrino es un fantasma que recorre el Universo. Como veremos más adelante, esta partícula juega un papel muy importante en cosmología.

Un hecho notable de la naturaleza es la existencia de la *antimateria*. A todo tipo de partícula elemental —excepto el fotón— corresponde también una antipartícula con la misma masa, pero carga eléctrica contraria, además de otras propiedades invertidas. Así, al electrón le corresponde el antielectrón, llamado comúnmente *positrón*, cuya carga es positiva; al protón le corresponde al *antiprotón*, de carga negativa, etc. Cuando una partícula entra en contacto con su correspondiente *antipartícula,* las dos se aniquilan produciendo un par de fotones muy energéticos: rayos *gamma*. La única excepción a esta regla son los neutrinos y antineutrinos que no pueden producir fotones.

El proceso inverso también es posible: si dos fotones tienen suficiente energía, pueden aniquilarse al chocar entre sí y producir un par partícula-antipartícula.

El proceso de creación y aniquilamiento es una excelente ilustración de la famosa equivalencia entre masa y energía dada por la fórmula de Einstein $\boldsymbol{E = mc^2}$. Al chocar una partícula con su antipartícula, la masa de las dos se transforma íntegramente en la energía de dos fotones. Inversamente, dos fotones de mucha energía —rayos gamma— pueden, al chocar, transformar toda su energía en masa de un par partícula-antipartícula. Un meteorito de un gramo de antimateria que llegara a la Tierra se aniquilaría con un gramo de materia terrestre, liberando una energía equivalente a varias bombas atómicas. El hecho de que tal acontecimiento no suceda frecuentemente indica que, por lo menos en el Sistema Solar, no abunda la antimateria. (2) Hasta ahora, sólo se han visto antipartículas en los grandes aceleradores.

LA MATERIA CALIENTE

En nuestra experiencia cotidiana, la materia a nuestro alrededor se encuentra a temperaturas relativamente bajas (300 grados Kelvin) y parece tener un comportamiento apacible. Pero al aumentar la temperatura, nuevos fenómenos empiezan a aparecer. Recordemos que el calor es una manifestación macroscópica de la energía que poseen las moléculas de un cuerpo; éstas se mueven y chocan entre sí con velocidades o equivalentemente energías— que dependen de la temperatura. Un gas "frío" está constituido de moléculas, que, a su vez, están formadas de átomos; si se calienta el gas, las moléculas se mueven más rápidamente y chocan entre sí con más fuerza, hasta que, por encima de cierta temperatura que varía según el tipo de molécula, éstas se rompen y quedan átomos sueltos. Estos átomos también poseen energía y chocan entre sí; además, sus electrones pueden transformar parte de sus energías en fotones; por ello un

gas caliente brilla. Si se sigue aumentando la temperatura, los átomos empiezan a "sacudirse" de sus electrones; en ese caso, el gas queda constituido de electrones libres e *iones* átomos con menos electrones que protones—, y los electrones emiten fotones constantemente. Se dice que un gas en esas condiciones se encuentra parcialmente ionizado (un ejemplo es el gas neón que brilla en los tubos usados para iluminación). Por encima de cierta temperatura cuyo valor depende del elemento químico— los átomos se sacuden de todos sus electrones y se tiene entonces un gas totalmente ionizado: una mezcla de núcleos desnudos y electrones libres que emiten constantemente fotones.

Una de las propiedades importantes de un gas ionizado es que brilla sin ser transparente; la razón es que los electrones *libres* interactúan muy fácilmente con los fotones, chocando constantemente con ellos, desviando sus trayectorias y a veces absorbiéndolos. En cambio, los átomos no ionizados o las moléculas interactúan débilmente con los fotones, por lo que un gas no ionizado (el aire, por ejemplo) puede ser muy transparente (Figura 32).

(Las nebulosas que mencionamos en el capítulo II —las nebulosas gaseosas y no las galaxias— son nubes de gas ionizado, que en algunos casos pueden llegar a medir varios años luz y tener una masa equivalente a varios millones de estrellas, como la nebulosa de Orión (Figura 33). Estas nubes son calentadas por las estrellas que se encuentran en ellas.

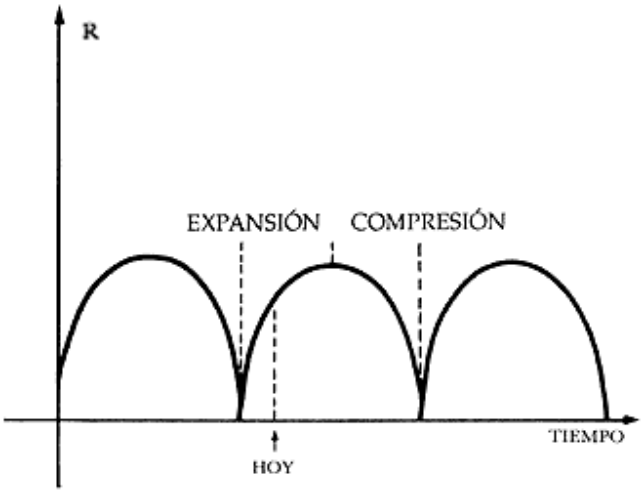

Figura 35. El factor de escala, en el Universo cíclico.

Hemos mencionado que la materia y la antimateria se aniquilan al entrar en contacto. Pero existe una situación en la naturaleza en la que pueden coexistir a temperaturas extremadamente altas Si la temperatura de un gas llega a ser superior a unos 5 000 millones de grados Kelvin, los fotones en el gas tienen tanta energía que, al chocar entre sí, crean pares de electrón-positrón; éstos se aniquilan con otros electrones y positrones, pero los fotones producidos chocan con otros fotones para volver a crear electrones y positrones, y así sucesivamente. El resultado neto es que los electrones, positrones y fotones pueden coexistir en

equilibrio creándose y aniquilándose continuamente (Figura 34). Si la temperatura del gas es superior a unos 10 millones de millones de grados, aparecen también protones y neutrones con sus antipartículas, todos en equilibrio con los fotones. A temperaturas aún superiores, se tendrá todo tipo de partículas exóticas con sus respectivas antipartículas, incluyendo cuarks y anticuarks, creándose y aniquilándose continuamente. Como veremos, en el siguiente capítulo, esta situación debió prevalecer durante los primeros segundos de vida del Universo.

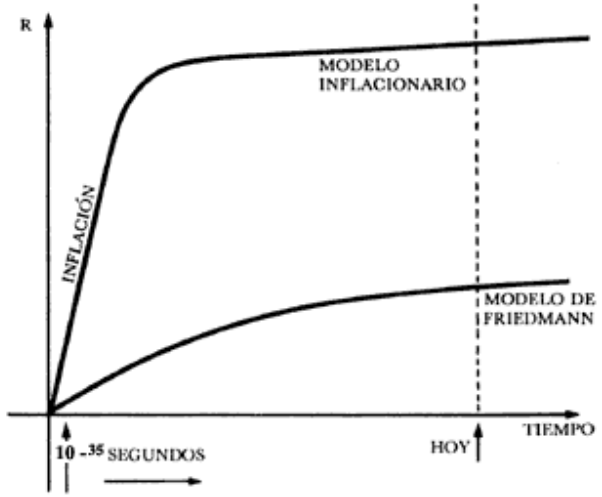

Figura 36. Evolución del factor de escala según el modelo del Universo inflacionario.

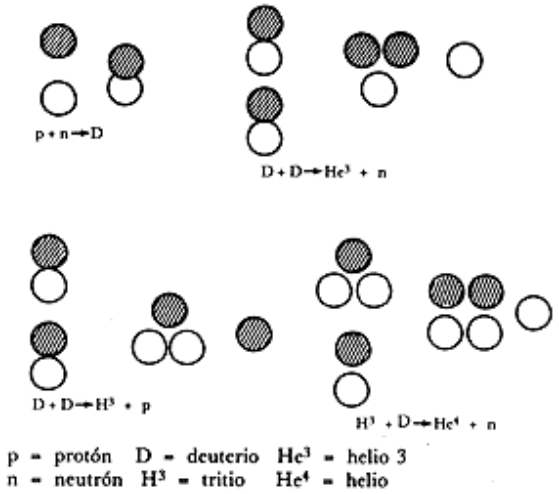

Figura 37. Producción de un núcleo de helio a partir de protones y electrones.

Figura 38. El radiotelescopio especialmente diseñado por Penzias y Wilson con el que descubrieron la radiación de 3ºK.

EL MUNDO DE PLANCK

Ninguna teoría física es absoluta. Al contrario, todas tienen un rango de validez fuera del cual se vuelven inútiles. La física newtoniana funciona perfectamente mientras no se tengan que considerar velocidades cercanas a la de la luz o dimensiones comparables a la de los átomos. Cuando un ingeniero diseña un edificio de varios pisos, utiliza la mecánica de Newton con resultados excelentes; pero un físico que quiera estudiar el comportamiento de un átomo deber recurrir a la mecánica cuántica, ya que, a escala atómica y subatómica, la mecánica newtoniana es totalmente increíble. De manera análoga, la Relatividad General no puede describir el mundo subatómico, pero, desgraciadamente, no disponemos aún de una teoría cuántica de la gravitación (aunque muchos físicos tienen la esperanza de que tal teoría surgirá en un futuro no muy lejano).

Nos podemos dar una idea del límite de validez de la Relatividad General a partir de consideraciones sobre las tres constantes fundamentales de la naturaleza:

***G*, la constante de la gravitación**

***c*, la velocidad de la luz.**

***h*, la constante de Planck**

Estas tres constantes aparecen tanto en la teoría de la gravitación como en la mecánica cuántica, y de los valores que tienen depende toda la estructura del Universo.

Si escogemos un sistema de medición en el que la unidad de longitud es el centímetro, la de tiempo el segundo y la de masa el gramo, resulta que las tres constantes tienen los siguientes valores, determinados experimentalmente:

***G* = 6.673... x 10^{-8} (centímetros)^3/(gramos) (segundos)^2**

***c* = 2.998...x 10^{10} (centímetros)/(segundos)**

***h* =1.055....x 10^{-27} (gramos) (centímetros)^2/(segundos)**

Pero, por supuesto, en otro sistema de unidades estos valores serán distintos. Centímetros, segundos y gramos son unidades convencionales muy útiles en nuestras experiencias cotidianas, pero cabe la pregunta de si no existe un sistema "natural" de unidades que la misma naturaleza haya escogido. Planck se dio cuenta de que combinando *G*, *c*, y *h* entre sí, se pueden obtener nuevas unidades. La combinación

$$\sqrt{\frac{G\,h}{c^3}}$$

tiene dimensiones de longitud y su valor es aproximadamente 10^{-33} centímetros; se le llama *longitud de Planck*. El tiempo que tarda la luz en recorrer esa distancia es

$$\sqrt{\frac{G\,h}{c^5}}$$

y es el tiempo de Planck: unos 10-44 segundos. Finalmente, la combinación

$$\sqrt{\frac{h\;c}{G}}$$

es la *masa de Planck*: unos 10^{-5} gramos. La longitud y el tiempo de Planck tienen valores tan extremadamente pequeños que parecen ser las unidades naturales de otro mundo, subyacente al mundo subatómico, con leyes físicas que no son totalmente desconocidas; el mundo de Planck es a los átomos lo que éstos al mundo macroscópico (simplemente para tener una idea, un electrón mide 10^{20} longitudes Planck). Por otro lado, la masa de Planck es muchísimo mayor que la masa de una partícula elemental; podría estar relacionada con las energías necesarias para "romper" una partícula elemental, energías que quedan totalmente fuera de nuestras posibilidades experimentales.

Si la Relatividad General es válida, lo será sólo para estudiar fenómenos a escalas mucho mayores que la longitud de Planck.

LAS FUERZAS FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA

Es un hecho fundamental de la naturaleza que existen cuatro tipos de fuerzas, o interacciones, con las que los cuerpos interactuan entre sí.

Un tipo de fuerza es la *gravitacional*, siempre presente en nuestra experiencia diaria, y también a escala cósmica: desde las partículas elementales hasta las galaxias están sujetas a esta fuerza.

Otro tipo de fuerza es la *electromagnética*, también familiar; es la responsable de que los electrones se mantengan unidos a los núcleos atómicos, los átomos a las moléculas, y las moléculas entre sí; debido a que existen cargas positivas y negativas que se cancelan mutuamente, la fuerza electromagnética no se manifiesta tan abiertamente a gran escala como la gravitacional.

Existe otro tipo de interacción, llamada *fuerte*, que actúa únicamente a nivel subatómico. Los protones en los núcleos se repelen eléctricamente debido a que tienen cargas del mismo signo, y sin embargo se mantienen unidos por la fuerza nuclear manifestación de las interacciones fuertes— que es mucho más intensa que la eléctrica; pero, a diferencia de esta última, la interacción fuerte es de alcance microscópico y no se manifiesta a escala humana.

Finalmente, existe la interacción *débil*, con la que interactúan muy débilmente las partículas elementales; es responsable, entre otras cosas, del decamiento radiactivo de ciertos núcleos y, en general, de todos los procesos en que intervienen los neutrinos. Precisamente los neutrinos son tan difíciles de atrapar porque sólo interactúan débilmente o gravitacionalmente con las otras partículas.

Estas cuatro interacciones tienen magnitudes muy distintas. Por ejemplo, la atracción gravitacional entre un protón y un electrón es 10^{40} veces menor que la atracción eléctrica entre esas dos partículas. Asimismo, la fuerza nuclear entre los protones en el núcleo atómico es unas cien veces más intensa que la fuerza eléctrica entre ellos, y esta última es mil veces más intensa que la fuerza débil.

Un sueño de los físicos modernos es construir una teoría en la que aparezcan unificadas todas las interacciones, como si cada una de ellas fuera una manifestación de una interacción más general. La idea surgió a raíz de que James Clerk Maxwell, el más grande físico del siglo XIX, demostró que las fuerzas eléctricas y magnéticas son manifestaciones de una misma interacción: la electromagnética. Ya en nuestro siglo, Albert Einstein pasó la última parte de su vida tratando de construir una teoría que unificara las fuerzas gravitacionales y electromagnéticas, pero su búsqueda fue vana.

Los físicos parecían haber abandonado toda esperanza unificadora cuando surgió una luz a finales de los años sesentas: los físicos Weinberg y Salam demostraron que se podían unificar las interacciones débiles con las electromagnéticas; su

teoría fue confirmada posteriormente con experimentos realizados en aceleradores de partículas.(3)

¿Por qué hasta años recientes los físicos no habían percibido una relación entre las interacciones electromagnéticas y débiles?. La respuesta es que, en los procesos físicos entre partículas elementales que se estudian comúnmente, las energías implicadas son relativamente bajas; pero, a medida que las energías de las partículas aumentan, las dos interacciones empiezan a parecerse cada vez más hasta que se vuelven indistinguibles por encima de cierta energía crítica una energía que apenas se puede alcanzar en los aceleradores de partículas construidos recientemente.

Motivados por el éxito de la teoría de Weinberg y Salam, los físicos han tratado de construir una teoría que unifique no sólo las interacciones electromagnéticas y débiles, sino también las fuertes con ellas. Una teoría así ha sido propuesta en la actualidad, pero es extremadamente díficil confirmarla en forma experimental porque la energía crítica para la unificación de esas tres interacciones queda totalmente fuera del alcance de la tecnología moderna. La teoría mencionada predice que el protón no es completamente estable, sino que debe de decaer en otras partículas más ligeras —*aunque* la vida promedio de un protón excede ampliamente la edad del Universo. Hasta ahora no se ha podido detectar el decaimiento de ningún protón, por lo que la teoría seguramente necesitará modificaciones; empero, la idea de unificar tres interacciones fundamentales es demasiado atrayente como para desecharla con facilidad.

Finalmente queda la gran ilusión de los físicos teóricos: una teoría unificada de las cuatro interacciones fundamentales. Algunos ya están trabajando en ella y quizás se tengan resultados concretos en el futuro. Los físicos sospechan que tal "superunificación" se produce cuando las energías de las partículas exceden la "energía de Planck": es decir, la masa de Planck multiplicada por c^2, lo cual es una energía fabulosa para una partícula elemental.

A estas alturas, el lector se estará preguntando seguramente ¿qué tiene que ver todo lo anterior con el Universo, con sus estrellas y sus galaxias? Sorprendentemente, existe una relación: si el Universo nació en un estado de altísima densidad y temperatura, las partículas que lo componían recorrieron toda la gama de energías. Las épocas más tempranas del Universo sólo se pueden estudiar a través de las teorías modernas de partículas elementales; recíprocamente, la cosmología puede servir para confirmar o refutar, a través de observaciones astronómicas, dichas teorías. Los físicos de partículas elementales realizan sus experimentos en aceleradores que requieren de enormes cantidades de energía, pero esas energías son risibles a escala astronómica. El espacio cósmico es un laboratorio que dispone, literalmente, de toda la energía del Universo; no podemos manejarlo a nuestro antojo, pero sí podemos aprender a interpretar sus mensajes.

NOTAS

(1) Los neutrones sólo son estables si están amarrados en un núcleo atómico.

(2) Se ha sugerido que la famosa explosión de Tunguska, Siberia, en 1908, se debió a la caída de un meteorito de antimateria.

(3) Weinberg y Salam obtuvieron el premio Nobel en 1979 por su trabajo.

VI. EN EL PRINCIPIO ERA...

¿DE DÓNDE SALIÓ EL UNIVERSO?

DESPUÉS de este breve paseo por el mundo microscópico, volvamos a nuestro Universo. El primer problema al que nos enfrentamos es el de saber si nuestras teorías físicas pueden describir el momento mismo de su nacimiento. ¿Acaso tiene sentido hablar del principio del tiempo, o considerar densidades y temperaturas infinitas? Como señalamos en el capítulo anterior, la Relatividad General deja de ser válida a escala del mundo de Planck. Es obvio, entonces, que la teoría de la Gran Explosión es incapaz de describir el Universo cuando tenía menos de 10^{-44} segundos de existencia, que es el tiempo de Planck. Pero esta limitación es extremadamente generosa y no todos los físicos pueden resistir la tentación de elaborar teorías sobre el Universo cuando su edad apenas excedía el tiempo de Planck.

Lo que vamos a exponer en el presente capítulo podrá parecer terriblemente especulativo, pero —y esto es lo fundamental— está basado en extrapolaciones, temerarias pero válidas, de leyes bien establecidas de la física.

Sean o no válidos para tiempos muy pequeños, los modelos teóricos de Friedmann predicen que, en el principio mismo del tiempo, la densidad del Universo era infinita. A un estado así los físicos lo llaman *singularidad*; esto únicamente implica que ninguna ley física puede describirlo: más que un concepto físico, la singularidad es un reconocimiento de nuestra completa ignorancia. Empero, podemos sosloyar el problema de la singularidad en forma decorosa si invocamos la invalidez de la Relatividad General para tiempos menores que el tiempo de Planck: no estamos obligados a describir lo que queda fuera del campo de la física.

Sin embargo, queda la posibilidad de que el Universo, en lugar de nacer de una singularidad, haya tenido inicios más accesibles al entendimiento. De hecho, el "estado inicial" del Universo pudo ser extremadamente simple: tan simple como un espacio totalmente vacío. Si ése fue el caso, ¡la materia surgió en algún momento de la nada!; y, cierto tiempo después de esta creación *ex nihilo* —tiempo no mucho mayor que el de Planck—, las condiciones físicas del Universo llegaron a ser como las supuestas por Friedmann; sólo en ese momento se inició la expansión que conocemos.

Por extraño que parezca, nuestro Universo pudo surgir de un espacio vacío y eterno sin violar las leyes de la física: éstas sólo requieren que se conserven ciertas cantidades, como la carga eléctrica, la energía total y el exceso (o defecto) de partículas sobre antipartículas. Si el Universo surgió de la nada, su carga eléctrica y su energía total deben haber sido nulas, y el número de partículas igual

al de antipartículas, tanto ahora como en el principio, pues ésas eran las condiciones del vacío primordial; veamos si eso es plausible.

La carga eléctrica total del Universo es nula, según lo indican todas las observaciones astronómicas. La carga del electrón es exactamente la misma en magnitud, pero de signo contrario, que la del protón; y todo indica que el número de protones y electrones en el Universo es idéntico.

La energía total del Universo bien podría ser nula. En efecto, la energía puede ser tanto positiva como negativa. En un cuerpo cualquiera, la mayor parte de la energía se encuentra en forma de masa según la fórmula de Einstein $E=mc^2$; esta energía es *positiva*. Por otra parte, la energía gravitacional es *negativa*, lo cual significa simplemente que hay que impartirle energía a un cuerpo para alejarlo de otro que lo atrae gravitacionalmente. Ahora bien, existe una curiosa relación entre la energía en forma de masa de un cuerpo cualquiera, y su energía gravitacional debida a la atracción de toda la materia dentro del Universo visible: las dos energías tienen magnitudes comparables (dentro de las incertidumbres inevitables) pero son de signo contrario, por lo que resulta factible que se cancelen mutuamente. Así, la energía total del Universo podría ser nula, y la energía en forma de masa estaría compensada exactamente por la energía gravitacional.

Por último, ¿pudo nacer el Universo con la misma cantidad de materia y antimateria? Vimos anteriormente que las partículas y antipartículas pueden coexistir a muy altas temperaturas; veremos con más detalle en el siguiente capítulo que ésa era la situación durante los primeros segundos del Universo, cuando había *casi* la misma cantidad de materia y antimateria. Al bajar la temperatura, las partículas y antipartículas se aniquilaron mutuamente y sólo sobrevivió un pequeño excedente de materia. La física moderna tiene una explicación del origen de ese excedente: hace algunos años, los físicos encontraron pruebas experimentales de que existe una pequeñísima asimetría entre el comportamiento de las partículas y el de las antipartículas.Esa ligera asimetría pudo causar que, en los primeros instantes del Universo, se formara un poco más de materia que de antimateria.

¿Qué hizo surgir al Universo de la nada? Los partidarios de la creación *ex nihilo* tienen una respuesta basada en la física moderna. Según la mecánica cuántica, el vacío no está realmente vacío sino repleto de partículas y antipartículas, llamadas "virtuales", que se crean y se destruyen azarosamente; en una región microscópica pueden surgir súbitamente un electrón y un positrón, que se aniquilan casi inmediatamente en un tiempo demasiado corto para que puedan ser detectados; un proceso así se llama *fluctuación cuántica.* Para los lectores incrédulos, señalamos que no todos los físicos aceptan la existencia de fluctuaciones cuánticas, aunque todos admiten que el concepto de vacío presenta, a la luz de la física moderna, una serie de problemas formidables que aún estamos lejos de entender. Sea lo que fuere, si se admiten las ideas anteriores, bien podría ser que el Universo mismo haya sido una fluctuación cuántica del vacío. ¿Y cómo se generó tal cantidad de materia y antimateria?; a esto los

partidarios de la creación ex nihilo contestan que, después de todo, se dispuso de un tiempo infinito para que, alguna vez, se produjera una *fluctuación cuántica* de la magnitud del Universo. Si la probabilidad de un evento es extremadamente pequeña, pero no cero, tendrá que suceder alguna vez si se dispone de tiempo suficiente. A la pregunta ¿por qué nació el Universo con las propiedades que le conocemos?, se contesta fácilmente: de haber nacido otro tipo de Universo, no existiríamos nosotros para nombrarlo. Y ya para terminar, podríamos preguntarnos si tiene sentido el concepto de un espacio vacío, desprovisto de toda materia, pero en el cual estén dadas las leyes de física. Esta pregunta desborda el campo de la física y nos lleva de lleno a la metafísica y al misticismo.

¿Nació el Universo del vacío, o de una singularidad escondida en el mundo inescrutable de Planck? Es curioso que el concepto de la Creación a partir de la nada o de un estado indescriptible (el "caos primordial") ha atraído la imaginación humana (¿se trata acaso de un arquetipo junguiano?).

Queda aún otra posibilidad para la Creación. Vimos en el capítulo IV que, según los cálculos de Friedmann, si la densidad de masa del Universo excede cierto valor, la expansión cósmica se detendrá en algún momento y se iniciará una contracción. Eventualmente, toda la materia del Universo volverá a comprimirse —en otra singularidad, quizás— como en los inicios de la Gran Explosión. Si tal es el destino del Universo, podemos concebir que la contracción terminará en una "Gran Compresión" a la que seguirá otra Gran Explosión, y así sucesivamente (Figura 35). Un número inconmensurable de ciclos se sucederá eternamente, como en la cosmología védica. Consideraremos la posibilidad de este evento en el siguiente capítulo.

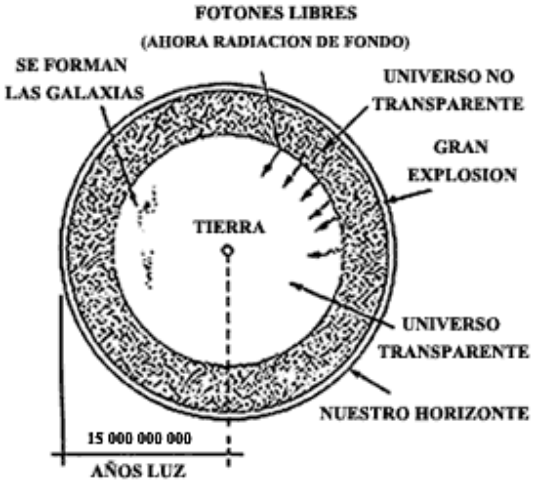

Figura 39. La parte del Universo accesible a nuestras observaciones se encuentra dentro del horizonte cósmico, que corresponde justamente al lugar y momento de la Gran Explosión. El Universo no era transparente en un principio, así que no podemos ver directamente lo que sucedió durante los primeros cientos de miles de años del Universo. Al volverse

transparente, los fotones emitidos por la materia incandescente se liberaron súbitamente y ahora los observamos como la radiación de fondo.

EL UNIVERSO INFLACIONARIO

La mayoría de los cosmólogos modernos piensan que, independientemente de su origen, el Universo empezó a expanderse en algún momento tal como lo predice la teoría de la Gran Explosión. Cuando el Universo tenía menos de 10^{-35} segundos (10^{8} veces el tiempo de Planck), las partículas que lo componían poseían tanta energía que las interacciones fuertes, electromágneticas y débiles eran indistinguibles entre sí —en el sentido explicado en el capítulo anterior—. A los 10^{-35} segundos, la temperatura del Universo era de unos 10^{28} grados Kelvin; si hemos de creer en las teorías de la Gran Unificación, fue en ese momento cuando las interacciones fuertes se desligaron de las electromagnéticas y débiles. Hace algunos años, se descubrió que dichas teorías predecían un curioso e interesante efecto: la separación de las interacciones fuertes de las otras interacciones debió ser un proceso extremadamente explosivo de la materia, en el que se liberaron cantidades colosales de energía. La consecuencia más importante fue que, a los 10^{-35} segundos, el Universo se expandió muchísimo más rápidamente que lo que se esperaría según el modelo de Friedmann: en menos de 10^{-33} segundos, la distancia entre dos puntos materiales aumentó por un factor de 10^{28} o más. Este es el modelo del *Universo inflacionario* (Figura 36).

Este modelo se ha vuelto muy popular porque resuelve de un golpe varios problemas de la cosmología. En primer lugar, explica por qué el Universo es homogéneo en todas las direcciones, aun en regiones que nunca tuvieron tiempo de influirse entre sí (volveremos a este problema en el próximo capítulo). Si el Universo sufrió una inflación violenta, la materia que estaba inicialmente en contacto fue arrojada en todas direcciones con velocidades cercanas a la de la luz —y muy superiores a la velocidad de expansión predicha por los modelos de Friedmann— en esta forma, regiones del Universo que vemos en direcciones diametralmente opuestas estuvieron en contacto cuando se iniciaba la expansión cósmica.

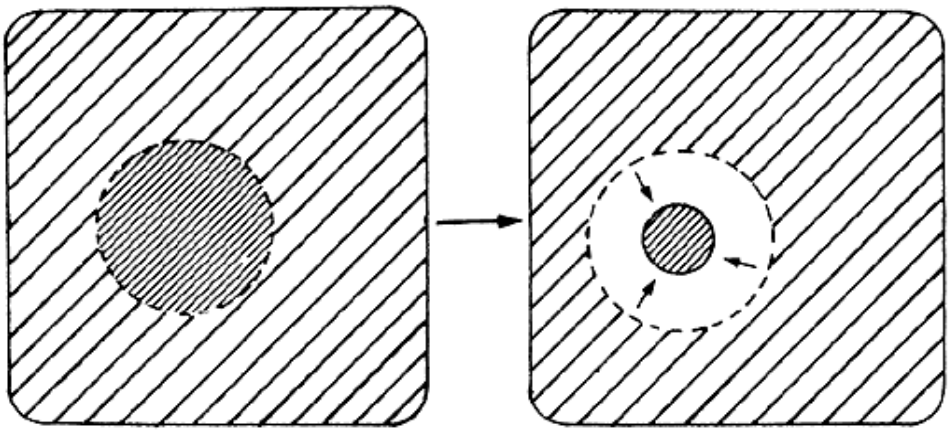

Figura 40. Una pequeña perturbación de la densidad en un medio homogéneo puede producir el colapso gravitacional de una región cuya masa contenida exceda un valor crítico.

Otro problema es el de la densidad del Universo; en principio, ésta podría tener cualquier valor, pero, curiosamen te, la densidad observada no difiere lo suficiente de la densidad crítica para poder decidir, por lo menos hasta ahora, si el Universo es abierto o cerrado. El modelo inflacionario predice que la densidad del Universo debe ser justo la crítica, lo cual es compatible con las observaciones astronómicas.

En algún momento, la inflación debió de detenerse (ésta es la parte más oscura de la teoría) y dar lugar a una expansión como la predicha por Friedmann. La evolución posterior del Universo fue más apacible; así, por ejemplo, a los 10^{-12} segundos la temperatura había bajado a 10^{16} grados Kelvin y fue en ese momento cuando se separaron también las interacciones débiles de las electromagnéticas; este proceso no fue tan catastrófico como el que causó la inflación. Con el paso de los microsegundos, el Universo fue evolucionando y la parte especulativa de la teoría va disminuyendo.

El concepto del Universo inflacionario está basado en ciertas teorías de partículas elementales que aún no han sido confirmadas plenamente, pero la idea es muy interesante y ofrece la posibilidad de investigar las épocas más remotas del Universo. Veremos más adelante que las teorías mencionadas ofrecen la posibilidad de entender el origen de las galaxias.

VII. LOS INSTANTES INICIALES

El diámetro del Aleph sería de dos o tres

centímetros, pero el espacio cósmico

estaba ahí, sin disminución de tamaño.

JORGE LUIS BORGES, *El Aleph*

LOS PRIMEROS TRES MINUTOS

DESPUÉS de la inflación—si realmente ocurrió—, prosiguió la expansión cósmica, de acuerdo con la teoría de la Gran Explosión. Debido a sus altísimas temperaturas, el Universo debió ser inicialmente una "sopa de cuarks" y anticuarks, electrones, positrones, neutrinos, antineutrinos, etc., que se creaban y aniquilaban continuamente. Un millonésimo de segundo después de la Gran Explosión, la temperatura del Universo había bajado unos 10^{13} grados Kelvin, se cree que a esas temperaturas los cuarks y anticuarks pueden combinarse para formar las partículas elementales como el protón, el neutrón y muchas más, incluyendo sus antipartículas. Vamos a seguir la evolución del Universo a partir de ese momento.

Después de un millonésimo de segundo, a una temperatura inferior a $\mathbf{10^{13}}$ grados Kelvin, los protones y neutrones ya no pudieron coexistir con sus respectivas antipartículas y se aniquilaron mutuamente, transformando toda su masa en energía en forma de fotones. Afortunadamente, existía un ligerísimo exceso de materia sobre antimateria que sobrevivió por no tener una contraparte con la cual aniquilarse (en el capítulo anterior, señalamos un posible origen de este exceso): la materia actual es el residuo de lo que quedó en aquella época. Se ha calculado que por cada gramo que sobrevivió tuvieron que aniquilarse del orden de mil toneladas de materia y antimateria; la cantidad de energía liberada por tal proceso rebasa todo lo concebible.

Un segundo después de la Gran Explosión, la temperatura era de unos $\mathbf{10^{10}}$ grados Kelvin. Los constituyentes principales del Universo eran: protones, electrones, positrones, neutrinos, antineutrinos y fotones. Todos ellos interactuaban entre sí —incluyendo los elusivos neutrinos, ya que sus energías y la densidad de la materia eran lo suficientemente altas para no dejarlos libres.

Los neutrones que no se encuentran formando parte de un núcleo atómico no son partículas estables. Un neutrón aislado decae espontáneamente en un protón, un

electrón y un antineutrino. La masa de un neutrón es ligeramente superior a la de un protón más la de un electrón, por lo que, al decaer, esa diferencia de masa se transforma en energía del electrón y del antineutrino producidos. Por el contrario, un protón no decae espontáneamente: sólo puede transformarse en un neutrón si choca con un electrón o un antineutrino cuyas energías sean suficientes como para compensar la diferencia de masa.

A temperaturas de **10 10** grados Kelvin, las partículas elementales en el Universo tenían suficiente energía para permitir que los protones y neutrones se transformaran continuamente unos en otros. Pero, al ir bajando la temperatura, disminuyó la abundancia de neutrones, ya que era cada vez más difícil que se produjeran para reponer los que se transformaban en protones.

Siguió bajando la temperatura: a 5 000 millones de grados Kelvin, todos los positrones se aniquilaron con los electrones quedando sólo el excedente de estos últimos; el resultado final fue un número igual de protones y electrones (la carga eléctrica neta del Universo es cero). Por esa misma época, los neutrinos y antineutrinos empezaron a dejar de interactuar con el resto de la materia.

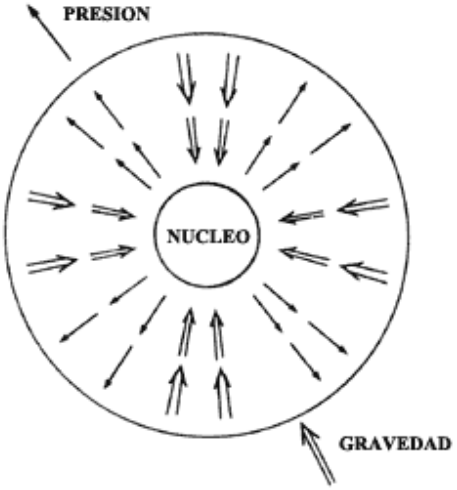

Figura 41. En una estrella, la presión y la gravedad se compensan mutuamente.

Después de tres minutos de iniciada la expansión cósmica, la temperatura había bajado a 1 000 millones de grados Kelvin. A partir de ese momento, la especulación va a ceder el lugar a los hechos comprobables. Hemos señalado que la cantidad de neutrones fue disminuyendo con la temperatura, pero, antes de que desaparecieran por completo, las condiciones se volvieron favorables para que entraran en escena nuevos tipos de reacciones. Al chocar un protón y un neutrón, se pueden unir para formar un núcleo de *deuterio* (hidrógeno pesado). A su vez, los núcleos de deuterio chocan entre sí y llegan a formar, a través de varias reacciones nucleares, núcleos de helio y elementos más pesados (Figura 37). Lo interesante de este proceso es que ocurre a una *temperatura crítica* de unos 1 000 millones de grados Kelvin. A temperaturas superiores, los protones y neutrones

tienen demasiada energía y destruyen, al chocar, los núcleos de deuterio que se hayan podido formar. A temperaturas menores, los núcleos de deuterio —que tienen carga eléctrica positiva— no poseen suficiente energía para vencer su repulsión eléctrica, por lo que les es imposible unirse y formar núcleos más pesados.

A temperaturas inferiores a los 1 000 millones de grados Kelvin, los núcleos atómicos que lograron formarse no podrán volverse a destruir, por lo que fijarán la composición química posterior del Universo. Todos los cálculos teóricos indican que, después de tres minutos, la masa del Universo quedó compuesta aproximadamente por 75% de hidrógeno, 25% de helio y apenas una traza de otros elementos. Ésta es la composición química que tenía el Universo en una época remota, antes de que nacieran las estrellas (veremos más adelante que la mayoría de los elementos que encontramos en la Tierra no son primordiales, sino que fueron "cocinados" en el interior de las estrellas). La abundancia de helio primordial se ha podido calcular a partir de observaciones astronómicas y el resultado concuerda extraordinariamente bien con la predicción teórica; ésta es una de las pruebas más fuertes en favor de la teoría de la Gran Explosión.

LA RADIACIÓN DE FONDO

Después de tres minutos, y durante los siguientes cien mil años, no sucedió nada particular. El Universo siguió expandiéndose y enfriándose continuamente. La materia consistía principalmente de núcleos de hidrógeno y helio, de electrones libres y de fotones (además de los neutrinos y antineutrinos que ya no interactuaban con el resto de la materia): en resumen, un gas ionizado. Como explicamos en el capítulo V, la materia en esas condiciones brilla, pero no es transparente a la luz debido a que los fotones chocan constantemente con los electrones libres.

Cuando la temperatura bajó a unos 4 000 grados Kelvin, la situación cambió drásticamente. Los electrones, que hasta entonces andaban libres, pudieron, por primera vez, combinarse con los núcleos atómicos y formar los primeros átomos: ésa fue la *época de la recombinación*. La materia en el Universo dejó de ser un gas ionizado; al no quedar electrones libres, los fotones dejaron de interactuar con la materia y siguieron su evolución por separado. A partir de ese momento, el Universo se volvió transparente.

En nuestra época, unos 15 000 millones de años después de la Gran Explosión, el Universo se ha enfriado considerablemente, pero los fotones que fueron liberados en la época de la recombinación deben estar presentes todavía, llenando todo el espacio cósmico. Esos fotones fueron emitidos por la materia cuando se encontraba a una temperatura de unos 4 000 grados. Un gas a algunos miles de grados radia principalmente luz visible e infrarroja; pero recordemos que el Universo está en expansión y que, por lo tanto, la materia que emitió los fotones cósmicos se está alejando actualmente de nosotros a velocidades muy cercanas a la de la luz. Por lo tanto, los fotones emitidos han sufrido un enorme corrimiento al

rojo; la teoría predice que deben de observarse, en nuestra época, en forma de ondas de radio. Ésta es la forma de radiación que emite un cuerpo a unos cuantos grados sobre el cero absoluto, que correspondería, en consecuencia, a la temperatura actual del Universo.

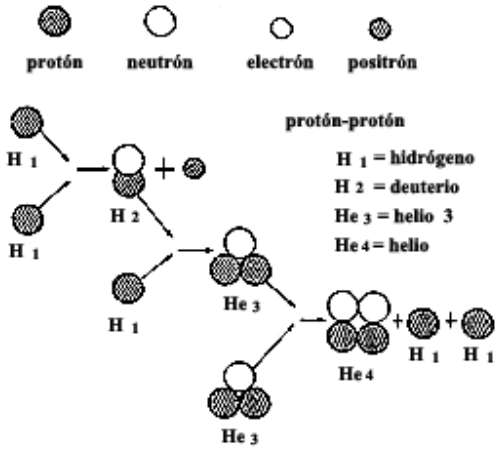

Figura 42. El ciclo protón-protón

En 1965, los radioastrónomos estadounidenses Penzias y Wilson descubrieron una débil señal de radio que provenía uniformemente de todas las regiones del firmamento, sin variar ni con la dirección, ni con el tiempo (Figura 38). Al principio pensaron que era un defecto de su antena de radio y trataron de eliminarla por todos los medios. Pero la señal seguía ahí. Finalmente, se convencieron de que tenía un origen cósmico: eran los fotones "fósiles" que quedaron de la época de la recombinación. Más aún, determinaron que la temperatura actual del Universo (derivada de la energía de esos fotones "fósiles") es de unos tres grados sobre el cero absoluto. El descubrimiento de esta radiación de fondo es otra de las pruebas más importantes en favor de la teoría de la Gran Explosión.

¿FINITO O INFINITO?

Figura 43. La nebulosa del Cangrejo.

Regresemos por un momento al problema de la extensión del Universo y reexaminémoslo a la luz de la cosmología moderna. ¿Es el Universo finito o infinito? Hemos visto qué los modelos de Friedmann admiten dos posibilidades: un universo *cerrado* sobre sí mismo, que se expande hasta cierto punto y luego se contrae, y un universo *abierto*, de volumen infinito, que se expande eternamente (el primer caso está acorde con la concepción original de Einstein de un universo limitado pero sin fronteras).

En principio, el Universo es abierto o cerrado según si su densidad de masa en el momento actual excede o no cierto valor crítico que, según los modelos de Friedmann, está dado por la fórmula

$$\textbf{densidad crítica} = \frac{3\,H^2}{8\pi\,G}$$

donde *H* es la constante de Hubble y G la constante gravitacional. Este valor resulta ser de unos **2 X 10^{-29}** gramos por centímetro cúbico, o algo así como diez átomos de hidrógeno por metro cúbico. Desgraciadamente, aún no se ha podido determinar con suficiente precisión la densidad real del Universo para compararla con la crítica. (Unos cuantos átomos por metro cúbico parece una densidad extremadamente baja, pero no debemos olvidar que los cuerpos densos como las estrellas y los planetas son apenas puntos en la inmensidad del vacío cósmico; la densidad a la que nos referimos es un promedio universal.) Los astrónomos han estimado que si la masa en el Universo es principalmente la de las estrellas que brillan, entonces la densidad del Universo no llegaría a una centésima de la crítica, y el Universo, por lo tanto, debe ser abierto. Sin embargo, no es evidente que la mayor parte de la materia en el Universo brille lo suficiente para ser visible. Se ha podido demostrar que las galaxias en los cúmulos galácticos no podrían mantenerse unidas por su mutua atracción gravitacional, a menos de que sus masas fueran sensiblemente superiores a la visible. El problema de la "masa faltante" aún no se ha podido resolver satisfactoriamente. Esta masa podría encontrarse en forma de estrellas enanas casi sin brillo, de nubes opacas, de "halos" galácticos, de gas intergaláctico, de polvo, de pedruscos, de hoyos negros o hasta de partículas elementales exóticas, que interactúan sólo gravitacional o débilmente con la materia común y que, por lo tanto, no pueden descubrirse directamente.

Existe una manera indirecta de determinar la densidad del Universo. Según los cálculos de los cosmólogos, las abundancias de los elementos químicos que se produjeron a los tres minutos dependen de la velocidad de expansión del Universo, y ésta, a su vez, depende de su densidad. Se ha demostrado que la abundancia del helio primordial debe de variar entre 25 y 30%, según la densidad del Universo —en otras palabras, según si es abierto o cerrado— por otra parte, la

abundancia del deuterio primordial es muy sensible a la densidad, pero, siendo este elemento muy raro, es mucho más difícil detectarlo. No es un problema simple estimar, a partir de observaciones astronómicas, cuál fue la composición primordial de la materia, porque las estrellas han estado "contaminando" el medio interestelar, como veremos en el capítulo siguiente. Pero aun aproximadas, las determinaciones más recientes de la cantidad de helio y deuterio primordiales son compatibles con un Universo abierto: indican que la densidad del Universo es superior a la de la materia visible, pero no excede la densidad crítica. Recordemos que, según la teoría inflacionaria, la densidad real debería ser justamente la crítica.

Hace algunos años, un grupo de físicos soviéticos anunció un descubrimiento que causó mucho revuelo: el neutrino parecía tener, en contra de lo que se creía, una pequeña masa. Aún no hay unanimidad entre los físicos sobre este hallazgo y todavía no se ha podido confirmar por medio de experimentos independientes; pero si la masa del neutrino no es exactamente cero, se tendrían repercusiones muy interesantes para la cosmología. En primer lugar, la mayor parte de la masa cósmica podría encontrarse en forma de neutrinos ¡y hasta ser suficiente para cerrar el Universo! También podría ser que la "masa faltante" de los cúmulos de galaxias esté constituida por neutrinos atrapados por la atracción gravitacional de éstas. Y quizás estamos nadando en un mar de neutrinos sin sospecharlo. En un futuro cercano sabremos con certeza si el destino del Universo está regido por estas partículas fantasmas.

EL HORIZONTE DEL UNIVERSO

Si el Universo fuera abierto, su volumen sería infinito y, por lo tanto, también su masa sería infinita. Sin embargo, debemos distinguir entre el Universo como un todo y la parte de él que es accesible a nuestras observaciones. Si el Universo nació hace quince mil millones de años, no podemos ver objetos que se encuentren más lejanos que la distancia de quince mil millones de años luz, pues la luz emitida por ellos necesitaría un tiempo superior a la edad del Universo para llegar a nosotros. Así, nuestro *Universo visible* llega hasta un *horizonte* que se encuentra a unos quince mil millones de años luz. Evidentemente, el volumen y la masa del Universo visible son finitos. Mientras más lejos vemos en el Universo, vemos más atrás en el tiempo. Objetos que se encuentran a mil años luz, por ejemplo, se ven como eran hace mil años; del mismo modo, si pudiéramos ver el horizonte del Universo, estaríamos observando el momento mismo de la Creación. Y si no es posible ver nada detrás del horizonte, es porque más allá de él aún no había nacido el Universo. Sin embargo, con el fin de no especular innecesariamente, recordemos que de todos modos la materia del Universo no era transparente en el principio, por lo que no podemos observar aquello que sucedió antes del momento de la recombinación (Figura 39).

El horizonte, del Universo se ensancha un año luz cada año y, al pasar el tiempo, vemos objetos cada vez más lejanos. Del mismo modo, el horizonte era más estrecho en el pasado; por ejemplo, al tiempo de Planck el radio del "Universo visible" era igual a la longitud de Planck; 10-10 segundos después de la Gran Explosión el Universo visible era del tamaño del Aleph de Borges; y un segundo después, había alcanzado un radio de 300 000 kilómetros.

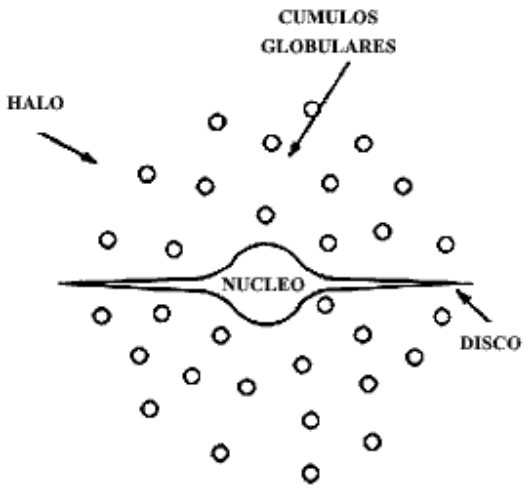

Figura 44. Esquema de una galaxia elíptica.

Según indican todas las observaciones astronómicas que se han efectuado hasta ahora, la distribución promedio de la materia es homogénea en todo nuestro Universo visible. Esta homogeneidad ha sido, en sí, todo un enigma. Si consideramos dos regiones del Universo cercanas a nuestro horizonte, pero en direcciones diametralmente opuestas, encontramos que sus densidades son las mismas, a pesar de que el tiempo que tardarían en influenciarse físicamente es mayor que la edad del Universo (no olvidemos que ninguna señal, interacción o cuerpo material puede viajar más rápido que la luz). ¿Cómo regiones tan alejadas pudieron "ponerse de acuerdo" para adquirir la misma densidad? De nada sirve invocar el hecho de que inicialmente la materia del Universo estaba muy concentrada, pues al tiempo de Planck el radio del "Universo visible" era igual a la longitud de Planck, y no podía haber influencia entre regiones más alejadas entre sí que esa distancia; regiones muy lejanas del Universo que ahora vemos en direcciones opuestas tampoco tuvieron tiempo de influenciarse en épocas muy remotas, a pesar de estar más cerca entre sí. Como vimos en el capítulo anterior, la teoría del Universo inflacionario ofrece una solución al problema de la homogeneidad.

Por último, señalemos que nada nos garantiza que en un futuro muy remoto, cuando el horizonte cósmico se haya ensanchado algunos miles de millones de años luz más, no se revele una nueva estructura cósmica, que no corresponda a los modelos de Friedmann. Pero dejemos ese problema a nuestros sucesores en el Universo.

VIII. OTRAS TEORÍAS DEL UNIVERSO

¿POR QUÉ LA GRAN EXPLOSIÓN?

LA MAYORÍA de los físicos y astrónomos de la actualidad está convencida de que la teoría de la Gran Explosión es esencialmente correcta. Las pruebas más fuertes aparte de la expansión misma del Universo, son la radiación de fondo y la abundancia del helio primordial. Estos dos descubrimientos, relativamente recientes, inclinaron definitivamente la balanza hacia la Gran Explosión. Hay que insistir en que esta teoría no es un dogma —nadie pretende que lo sea—, sino una explicación simple y natural de varios hechos observacionales que, de otra forma, no pueden comprenderse y, mucho menos, relacionarse entre sí.

Por otra parte, la objeción más seria a la teoría de la Gran Explosión era que la edad del Universo, deducida de los datos de Hubble, resultaba incómodamente corta, pues no excedía la edad de la Tierra calculada por métodos geológicos; pero este escollo fue superado cuando, en los años cincuentas, se revisaron todos los datos observacionales y se encontró que la expansión del Universo era más lenta que la estimada por Hubble y, por lo tanto, la edad del Universo bastante mayor de la que se pensaba.

En cuanto al aspecto teórico, se puede cuestionar la validez de la Relatividad General, sobre la cual está basada la teoría de la Gran Explosión. Nadie duda de que la mecánica de Newton tiene limitaciones, pero se han propuesto otras teorías gravitacionales que también la generalizan. Son muy pocos los experimentos u observaciones que se han podido hacer hasta la fecha para decidir cuál teoría gravitacional es la correcta; hasta ahora, la de Einstein ha pasado todas las pruebas, mientras que otras teorías se han enfrentado a serias dificultades. Pero no se puede afirmar que la Relatividad General ha sido confirmada más allá de toda duda. En todo caso, el gran mérito de esta teoría es la simplicidad y la coherencia de sus conceptos, que la distinguen de teorías rivales; si la estética tiene algún valor en las leyes de la naturaleza, entonces podemos confiar en la Relatividad General.

Para no ser parciales, vamos a citar a continuación algunas de las teorías cosmológicas rivales de la Gran Explosión; señalando, cuando así sea el caso, las dificultades con que se han topado para ser aceptadas plenamente. Algunas de estas teorías proponen premisas totalmente distintas de la teoría de la Gran Explosión, mientras que otras son variaciones sobre este tema.

LA TEORÍA DEL ESTADO ESTACIONARIO

Aquellos que rehúsan aceptar que el Universo tuvo un principio, pueden encontrar una opción satisfactoria en la teoría del estado estacionario. Según ésta, el Universo no sólo es uniforme en el espacio, sino también en el tiempo; así como, a gran escala, una región del Universo es semejante a otra, del mismo modo su apariencia ha sido la misma en cualquier época, ya que el Universo existe desde tiempos infinitos. Pero ¿cómo reconciliar la expansión del Universo con su apariencia eterna? Si se expande, su densidad debe de disminuir al paso del tiempo. La hipótesis fundamental de los proponentes del Universo estacionario es que nueva materia se crea continuamente de la nada, con lo cual la densidad del Universo se mantiene constante a pesar de la expansión. Para ello, es necesario que se creen aproximadamente 10^{-24} gramos de materia por kilómetro cúbico cada año, masa que equivale a apenas un átomo de hidrógeno. Evidentemente, queda del todo fuera de nuestras posibilidades comprobar experimentalmente si tal efecto existe. Por otra parte, la teoría no postula que la materia nueva se crea uniformemente por todo el espacio; podría ser que nace en regiones muy específicas, como por ejemplo en los núcleos de las galaxias, donde ocurren fenómenos muy extraños, como veremos en el capítulo X.

La teoría del estado estacionario perdió su popularidad cuando se descubrió la radiación de fondo, ya que no la explica de manera natural, en contraste con la teoría de la Gran Explosión. Además, la suposición de que se crea masa, y justamente en la proporción necesaria para mantener constante la densidad del Universo, es totalmente *ad hoc* y no está sustentada en ninguna teoría física o hecho observado.

LA HIPÓTESIS DEL FOTÓN CANSADO

Hemos indicado hasta ahora que el corrimiento de las líneas espectrales de las galaxias se debe al efecto Doppler: ésta es la única explicación en el marco de la física contemporánea. Sin embargo, no puede excluirse la posibilidad de que algún fenómeno desconocido, y no la recesión de las galaxias, sea la causa del corrimento.

El mismo Hubble fue extremadamente cauto al respecto. Siempre tuvo cuidado de señalar que el corrimiento al rojo se debe, *probablemente*, al efecto Doppler, pero que otras explicaciones no pueden excluirse *a priori*. La aprehensión de Hubble se debía a que la edad del Universo que resultaba de sus observaciones era incompatible con la edad de la Tierra. Cuando esta aparente contradicción se resolvió, cobró nuevo vigor el concepto de que las galaxias realmente se alejan de nosotros.

Si no se acepta que el Universo está en expansión, sino que las galaxias se encuentran fijas a la misma distancia, sólo se puede postular que los fotones

pierden energía —"se cansan"— al atravesar las distancias cósmicas, por lo que nos llegan con menos energía de la que disponían al iniciar su travesía —o sea, corridos hacia el rojo—. Empero, nuestros conocimientos de la física no aportan ningún sustento a esta hipótesis. Un fotón no puede perder energía a menos de que choque con otra partícula, pero esto provoca también que la trayectoria del fotón se desvíe. Después de un gran número de choques los fotones que transportan la imagen de un objeto se desvían aleatoriamente, volviendo borrosa la imagen. Sin embargo, nada de esto sucede con las galaxias: sus imágenes son nítidas, sus líneas espectrales están claramente localizadas, y los objetos cósmicos más lejanos no se ven como manchas borrosas.

La única otra circunstancia que se conoce en la que un fotón pierde energía es cuando tiene que escapar de la atracción gravitacional de un cuerpo masivo. Sin embargo, se puede demostrar que esto ocurre a costa de que las líneas espectrales se ensanchen notablemente, lo cual no se ha detectado. Además, una galaxia lejana exhibe un corrimiento al rojo uniforme en toda su extensión, mientras que su masa está concentrada en su núcleo y, por lo tanto, su atracción gravitacional es más intensa allí.

¿ES CONSTANTE LA CONSTANTE DE LA GRAVITACIÓN?

¿De qué orden de magnitud es el tiempo característico de los procesos atómicos? Si combinamos la carga *q* de un electrón con su masa *m* y la velocidad de la luz *c*, podemos formar la cantidad q^2/mc^3 que tiene unidades de tiempo: equivale a unos 10^{-23} segundos; y es la unidad de tiempo más apropiada para describir los fenómenos atómicos.(1)

Si medimos la edad del Universo en esa unidad atómica obtenemos, evidentemente, un número inmenso: aproximadamente 10 40. No habría nada de qué sorprendernos si no fuera por una curiosa coincidencia. Hemos visto que la fuerza eléctrica entre un protón y un electrón es unas 10^{40} veces: más intensa que la gravitacional ¿Es una casualidad que este número también sea, aproximadamente, la edad del Universo medida en unidades atómicas? No hay ninguna respuesta obvia; podría ser una casualidad, sin ninguna consecuencia, como podría ser la clave de un problema cosmológico fundamental. Hace algunas décadas, el físico británico Dirac formuló la hipótesis de que, la constante de la gravitación *G* no es en realidad constante sino que disminuye con el tiempo, por lo que la fuerza gravitacional en el pasado era más intensa. Según Dirac, la fuerza electromagnética y la gravitacional entre un protón y un electrón tenían la misma intensidad cuando nació el Universo, pero la "constante" gravitacional fue disminuyendo proporcionalmente con el tiempo; en el presente, es 10^{40} veces más pequeña que en el "principio", porque han transcurrido 10^{40} unidades atómicas de tiempo.

La conjetura de Dirac ha inspirado diversas teorías gravitacionales y cosmológicas. La única manera segura de comprobarlas o refutarlas es medir directamente una posible variación de *G*. Por ejemplo, si la gravitación disminuye con el tiempo, la Tierra debería de inflarse lentamente, lo cual tendría implicaciones geológicas que merecen estudiarse. Asimismo, la Luna se encontraría más cercana a la Tierra en el pasado y el mes lunar habría sido más corto. A partir de estas consideraciones, se ha podido establecer que *G* no varía con el tiempo en más de una parte en 10^{10}cada año —que corresponde a la precisión de las mediciones— pero la hipótesis de Dirac predice una variación aún menor, por lo que todavía no se puede afirmar nada definitivo sobre la constancia de *G*.

En cuanto al Universo, una fuerza gravitacional más intensa en el pasado habría afectado la expansión inicial, y esto, a su vez, modificado la producción de helio primordial. Desgraciadamente, las teorías con *G* variable que han aparecido hasta ahora no son lo suficientemente precisas para predecir una abundancia específica de helio u otros elementos, por lo que aún no se puede afirmar algo sobre la variación de *G* con base en la síntesis de los elementos primordiales.

EL UNIVERSO DE MATERIA Y ANTIMATERIA

Cuando miramos el cielo y vemos estrellas y galaxias, ¿podemos estar seguros de que están hechos de materia y no de antimateria? Una respuesta rigurosa sería negativa: las propiedades de la materia y la antimateria son las mismas, excepto por un cambio global del signo de las cargas (y la pequeña asimetría que ya mencionamos, pero que no tiene importancia para las consideraciones que siguen). Un antiátomo estaría formado por un núcleo (de carga negativa) de antiprotones y antineutrones, rodeado de positrones (de carga positiva); pero la luz emitida por tal antiátomo —y particularmente el espectro— sería *idéntico* a la emitida por un átomo normal. Por ello resulta imposible determinar si un objeto que se ve a lo lejos, en el espacio, está constituido de materia o antimateria, ya que el único conocimiento que tenemos de él es a través de la luz que nos manda. Quizás la galaxia de Andrómeda está hecha de antimateria. Y quizás algunas de las estrellas que vemos en nuestra galaxia son "antiestrellas". La única manera de confirmarlo directamente es enviarles una sonda espacial y ver si, al contacto con ellas, se aniquila íntegramente.

Sin embargo, no todo lo posible es real, y no hay ninguna razón perentoria de que la antimateria sea tan abundante como la materia. Muy por el contrario, el hecho de que el Universo esté en expansión y que, por lo tanto, su densidad de masa haya sido alta en el pasado remoto, descarta la posibilidad de que parte de la antimateria haya podido evitar el contacto con la materia y se haya salvado de la aniquilación (cuando la temperatura cósmica bajó a 10^9 grados Kelvin). En síntesis, una abundancia comparable de materia y antimateria es incompatible con la teoría de la Gran Explosión.

Otra dificultad es que si las nubes interestelares fueran parcialmente de antimateria, se estarían aniquilando y producirían un flujo continuo de *rayos gamma*. Los satélites artificiales diseñados especialmente para estudiar *rayos cósmicos* no han detectado nada que pueda corresponder a tal proceso.

Si existen antiestrellas o antigalaxias en el Universo, podrían, ocasionalmente, entrar en contacto con estrellas o galaxias de materia y producir explosiones catastróficas. Algunos físicos han sugerido que éste es el origen de la actividad en los núcleos galácticos y en los cuasares (véase el cap. X). Por lo que respecta a la vida organizada, esperemos que si existen seres de antimateria en algún lugar del Universo, no tengan la ocurrencia de visitarnos, pues las consecuencias serían fatales para ambos.

NOTAS

(1) Como dato informativo: equivale a 10^{21} veces el tiempo de Plank.

IX. LA EVOLUCIÓN CÓSMICA

EL ORIGEN DE LAS ESTRELLAS Y LAS GALAXIAS

HASTA ahora hemos descrito la evolución del Universo como si su densidad fuera homogénea en todo el espacio, una suposición que es válida mientras se consideren regiones muy grandes con respecto a los cúmulos de galaxias. Pero, en una escala más pequeña, la distribución de la materia en el Universo dista mucho de ser uniforme; por el contrario, se encuentra concentrada en estrellas, que forman galaxias, que a su vez se agrupan en cúmulos, separados entre sí por inmensas regiones casi totalmente vacías. Una teoría cosmológica no puede ser completa si no explica también el origen de la estructura a "pequeña" escala del Universo. Vamos a considerar este problema a continuación.

Más lejos se mira en el Universo y más atrás se ve en el tiempo, por la demora de la luz en recorrer las distancias cósmicas. A medida que han ido mejorando las técnicas de observación se han descubierto galaxias cada vez más lejanas sin que su abundancia parezca disminuir. Este hecho indica que las galaxias se formaron poco después de la Gran Explosión, seguramente antes de que transcurrieran unos cinco mil millones de años. Estamos seguros de que no han nacido galaxias recientemente porque nunca se ha encontrado alguna cercana en pleno proceso de formación.

Si pudiéramos ver suficientemente lejos en el Universo, tendríamos una visión del momento mismo en que empezaron a surgir las galaxias; desgraciadamente, las observaciones astronómicas se vuelven más difíciles al aumentar las distancias y se hacen necesarios telescopios cada vez más potentes. (En los últimos años, los astrónomos han detectado unos misteriosos objetos, los cuasares, que se encuentran en los confines del Universo visible, y que podrían ser galaxias en plena formación; volveremos a ellos más adelante.)

El problema de explicar el origen de las galaxias es uno de los más difíciles de la astrofísica moderna, pues prácticamente no se cuenta con observaciones en las cuales basarse. Por el momento, la teoría más aceptada es que las galaxias también se formaron por el mecanismo que, se cree, dio origen a las estrellas: la contracción gravitacional. (1) Por lo tanto, vamos a tratar primero del nacimiento de las estrellas.

La mayoría de los astrónomos piensa que las estrellas se forman a partir de las llamadas *nubes moleculares*, que son gigantescas nubes de gas denso y frío. Un pedazo de la nube se colapsaría sobre sí misma por su propia fuerza gravitacional si no fuera porque el gas que lo forma se encuentra relativamente caliente y, por lo tanto, ejerce una presión que compensa la atracción gravitacional. Si la

distribución del gas fuera perfectamente homogénea, la presión y la gravedad mantendrían el equilibrio por tiempo indefinido. Sin embargo, en situaciones reales, una parte de la nube puede ser ligeramente más densa que otra y romper, de este modo, el delicado balance entre presión y gravedad. Esto sucede si la masa de un pedazo de la nube excede cierto valor crítico, de modo tal que la fuerza de gravedad vence definitivamente y el pedazo empieza a contraerse, aumentando su densidad. Este proceso se llama colapso gravitacional. Lo interesante es que, no importa cuán pequeña haya sido la perturbación inicial de la densidad, la contracción procederá inevitablemente. A medida que se comprime el gas, aumenta su presión hasta llegar a compensar la fuerza gravitacional; en ese momento se detiene la contracción. La nueva configuración de equilibrio al que se llega después de una evolución complicada es una estrella (Figura 40); la nube de gas también puede fragmentarse en varios pedazos más pequeños durante el colapso, y cada pedazo formar una estrella o un planeta.

Una estrella es una gigantesca bola de gas incandescente que se mantiene en equilibrio gracias a dos fuerzas que se compensan exactamente: la presión del gas caliente, que tiende a expander la estrella, y la gravitación de la misma masa estelar, que tiende a contraerla (Figura 41). Una estrella obtiene energía para brillar de las reacciones nucleares que se producen en su centro, donde se dan temperaturas de varios millones de grados Kelvin. En ese sentido, una estrella es una gigantesca bomba atómica que funciona continuamente. El combustible principal es, por lo general, el hidrógeno que, al fusionarse para formar helio, libera grandes cantidades de energía. Otros procesos nucleares también son posibles, como veremos más adelante.

Figura 45. Galaxia con barra.

Figura 46. Galaxia elíptica.

El nacimiento de una estrella por el colapso gravitacional de una nube gaseosa es un fenómeno en principio plausible. En la versión más simple de esta teoría, una galaxia sería originalmente una nube más o menos homogénea de gas a partir de la cual se formaron los miles de millones de estrellas que la componen. Desgraciadamente, el proceso de contracción queda fuera de las posibilidades actuales de observación, y hasta ahora no se ha podido detectar una sola nube colapsándose para formar estrellas. Por esta razón, no se puede afirmar que el problema de la formación estelar haya sido resuelto en todos sus detalles.

El problema se agrava si tratamos de explicar el origen de las galaxias también por un proceso de colapso gravitacional, tal como lo acepta la mayoría de los astrónomos modernos. En principio, podemos suponer que las galaxias se formaron porque la materia cósmica no era perfectamente homogénea en los primeros instantes del Universo, sino que había regiones ligeramente más densas que el promedio: inhomogeneidades o "grumos" cósmicos. Estos grumos empezaron a contraerse por su propia gravedad y dieron lugar, con el paso del tiempo a las galaxias —más precisamente, a condensaciones gaseosas a partir de las cuales se formaron estrellas—. El inconveniente de esta teoría es que la expansión cósmica retarda considerablemente la velocidad de contracción. Se ha podido calcular que si una inhomogeneidad se formó un segundo después de la Gran Explosión, toda la edad del Universo no le sería suficiente para transformarse en algo parecido a una galaxia (por el contrario, un "grumo" en una nube molecular si se podría colapsar, bajo ciertas condiciones, en un tiempo razonable para formar una estrella).

Sin embargo, los partidarios del colapso gravitacional como origen de las galaxias señalan que la contracción de un grumo pudo iniciarse, en principio, en cualquier momento; y si, se quiere formar una galaxia, se puede fijar el inicio, "de la contracción de épocas tan remotas como las anteriores a la inflación. De hecho, las teorías modernas predicen que, en esos instantes iniciales, se generó todo un "zoológico" de objetos raros, "cuerdas" y "paredes" según la terminología

moderna, que, después de la inflación, pudieron sobrevivir y funcionar como "semillas" para formar galaxias. Los físicos interpretan a estos extraños objetos como pedazos inhomogéneos del vacío cuántico primordial; aún es temprano para afirmar si realmente existen —lo cual tendría repercusiones muy importantes en la física— o si, por el contrario, serán relegados al olvido. Sea lo que fuere, lo interesante de las conjeturas mencionadas es que se plantea el problema de buscar el origen de las galaxias en las propiedades de la materia a densidades y temperaturas extremadamente altas (muy superiores a las que se podrían alcanzar en un laboratorio terrestre).

Existen otras teorías, además de la inestabilidad gravitacional, sobre el origen de las galaxias. Una muy interesante (formulada por el astrofísico soviético L. M. Ozernoi) es, la teoría de la *turbulencia cósmica*, según la cual el Universo primordial se encontraba en un estado caótico, lleno de gigantescos remolinos de materia, tal como en un líquido turbulento. Después del momento de la recombinación, los remolinos sobrevivieron y se convirtieron en galaxias. De ser correcta esta hipótesis, el hecho de que muchas galaxias tengan forma de rehilete no sería casual.

Según otra hipótesis formulada por el astrónomo armenio Victor Ambartzumian, las galaxias se formaron, no por condensación de materia, sino por el proceso contrario: una expansión a partir de un núcleo primordial extremadamente denso y compacto. Tales núcleos podrían ser pedazos del Universo que no participaron de la expansión universal, sino que quedaron rezagados durante un largo tiempo. Hasta ahora, no se le ha podido encontrar un fundamento teórico a esta conjetura —por lo menos dentro del marco de la física contemporánea—, razón por la cual no ha llegado a ser tan popular como otras teorías. Sin embargo, hay que reconocer que esta hipótesis es perfectamente compatible con todas las observaciones astronómicas de las que disponemos. Como veremos en el capítulo X, el fenómeno de eyección de masa desde una región muy compacta es bastante común en el Universo y ocurre en condiciones y escalas muy variadas, mientras que la contracción de una distribución de masa nunca se ha podido observar. Además, Ambartzumian predijo, con base en su hipótesis, que fenómenos muy violentos debían de ocurrir en regiones sumamente compactas en los núcleos de las galaxias, lo cual ha sido confirmado plenamente en los últimos años.

LA COCINA CÓSMICA

Como vimos en el capítulo VII, la composición de la materia cósmica después de la formación del helio era de 75% de hidrógeno, 25% de helio y una leve traza de otros elementos. El lector seguramente habrá notado que esa composición química en nada se parece a la que se tiene en nuestro planeta Tierra. Nosotros mismos estamos hechos de elementos como el carbono, el oxígeno, el calcio y muchos más, respiramos una mezcla de oxígeno y nitrógeno, utilizamos metales como el hierro, el aluminio, el cobre y otros. El hidrógeno se encuentra en las

moléculas del agua; pero la presencia del helio en la Tierra es tan poco notoria que fue descubierto primero en el Sol. ¿De dónde vino toda esta diversidad de elementos si la composición inicial del Universo consistía prácticamente de hidrógeno y helio? La respuesta está en los astros.

Los alquimistas tenían razón al pensar que los elementos pueden transmutarse unos en otros, pero buscaron equivocadamente ese proceso en hornos y alambiques, cuando necesitaban temperaturas de millones de grados. La transmutación se produce naturalmente en el interior de las estrellas. Veamos cómo evolucionan una vez que se formaron, ya sea por contracción gravitacional o algún otro mecanismo. Una estrella empieza a brillar en el momento en que la temperatura en su interior llega a ser suficientemente alta para desencadenar reacciones nucleares; estas temperaturas se producen por la presión extremadamente elevada a la que se encuentra sometida la región central de la estrella; a su vez, la presión es mayor mientras más masiva es la estrella. Los núcleos de nuevos elementos se generan por fusión nuclear, tal como en los primeros minutos del Universo, pero la diferencia fundamental es que una estrella dispone de miles o millones de años para fabricar esos elementos, mientras que el Universo se enfrió rápidamente al expandirse.

Inicialmente, son los núcleos de hidrógeno (protones) los que se fusionan entre sí para producir núcleos de helio (Figura 42) La masa de un núcleo de helio es un poco menor que la masa por separado de los dos protones y dos neutrones que lo componen, y la diferencia de masa es justamente la que se convierte en la energía (según la fórmula de Einstein $\boldsymbol{E = mc^2}$) que hace brillar a la estrella. Eventualmente, el hidrógeno en el núcleo puede llegar a agotarse, pero entonces aparecen nuevas reacciones. Si la temperatura central excede de unos doscientos millones de grados, los núcleos de helio se fusionan entre sí y terminan produciendo núcleos de carbono y oxígeno. A temperaturas aún mayores, el carbono produce oxígeno, neón, sodio y magnesio. Y así sucesivamente: si la temperatura central excede de unos 3×10^9 grados, se pueden formar todos los elementos químicos cuyo peso atómico es menor que el del fierro. Los elementos más pesados que el fierro no pueden fabricarse por la fusión de núcleos más ligeros si no se les suministra energía adicional. (2) Después de un comportamiento bastante complicado, la estrella agotará su combustible disponible y se apagará, con cierta composición química que depende esencialmente de su masa.

Figura 47. Galaxia lenticular.

La masa de una estrella es el parámetro principal que determina sus propiedades físicas y su evolución. De hecho, no pueden existir estrellas con menos de una centésima parte de la masa del Sol, pues la temperatura y presión centrales serían insuficientes para iniciar reacciones nucleares: más que una estrella, se tendría un planeta. En el otro extremo, estrellas con más de cien veces la masa del Sol serían inestables y se desbaratarían rápidamente. En contra de lo que podría esperarse, mientras más masiva es una estrella, menos tiempo brilla: si bien dispone de más combustible nuclear, lo consume mucho más rápidamente que una estrella con menos masa. Los astrofísicos han calculado que una estrella extremadamente masiva quema todo su combustible en unos 10 000 años, mientras que una estrella como el Sol puede brillar modestamente durante diez mil millones de años (incidentalmente, el Sol se encuentra a la mitad de su vida).

En consecuencia de lo anterior, podemos afirmar con certeza que las estrellas que vemos brillar en el cielo tuvieron fechas de nacimiento muy distintas, y que, en la actualidad, siguen naciendo y muriendo. Antes de apagarse definitivamente, una estrella arroja al espacio parte de su masa, que incluye los elementos que procesó. Veamos cómo ocurre este fenómeno.

Una estrella cuya masa no excede de unas seis veces la del Sol tiende a arrojar una pequeña fracción de su material constitutivo en formas muy diversas. La nebulosa que se ve en la figura 11 es un ejemplo de este proceso; se cree que el Sol formará una nebulosa semejante al final de su vida. Después, a medida que se enfría la estrella por agotarse su combustible nuclear, se irá comprimiendo por la fuerza de su propia gravitación. Si la masa de la estrella no excede una vez y media la del Sol, terminará su evolución convirtiéndose en una *enana blanca*: una estrella unas cinco veces más grande que la Tierra, tan comprimida que una cucharada de su material pesa más de cien kilogramos.

Si la masa es ligeramente superior a una vez y media la del Sol, la estrella se contrae todavía más. Los protones y electrones que la constituyen se comprimen

tanto que se fusionan entre sí para formar neutrones. El resultado final es una *estrella de neutrones*, cuyo radio no excede de unos 10 kilómetros y es tan compacto que una cucharada de su material pesa miles de millones de toneladas. Los llamados *pulsares*, que fueron descubiertos hace algunos años, son estrellas de neutrones con un campo magnético muy intenso y que giran como faros, emitiendo pulsos en ondas de radio.

Si la masa de la estrella excede de unas seis veces la del Sol, su destino final es completamente distinto. Al término de su evolución, la estrella sufre una explosión catastrófica llamada *supernova*: en unas cuantas horas, se vuelve tan brillante como cien millones de Soles y puede verse aun si se encuentra en galaxias muy lejanas; ese brillo dura varios días, después de los cuales se va apagando paulatinamente. La última supernova observada en nuestra propia galaxia ocurrió en 1604; se cuenta que era visible de día y alumbraba como la Luna llena durante la noche. (3) Otra ocurrió en 1054, según los registros de los astrónomos chinos y japoneses; lo que queda de la estrella que explotó es actualmente la nebulosa del Cangrejo (Figura 43). Para los fines que nos interesan, mencionemos solamente que una explosión de supernova genera energía suficiente para fabricar por fusión nuclear todos los elementos más pesados que el hierro y, además, arrojarlos violentamente al espacio para enriquecer el gas interestelar con nuevo material. Luego, a partir de ese gas, se formarán nuevas estrellas y planetas como el Sol y la Tierra, y quizás también otros seres vivos. Los átomos de nuestro cuerpo provienen de estrellas que dejaron de brillar hace más de cinco mil millones de años. En palabras del poeta:

> Retrocede, igualmente, lo que antes fue de la tierra, a las tierras, y lo que se envió desde las playas del éter, de nuevo devuelto, eso reciben los templos del cielo. Y no acaba la muerte las cosas de modo tal que destruya de la materia los cuerpos [átomos], pero su reunión los disipa. De allí, uno a otros se junta, y hace todas las cosas de modo que conviertan sus formas y muden colores y tomen sentidos y en un punto de tiempo los pierdan...(4)

Figura 48. La nube mayor de Magallanes.

NOTAS

(1) Sugerida por Isaac Newton y estudiada teóricamente por el astrofísico inglés James Jeans.

(2) Un núcleo de uranio se puede *fisionar* en dos núcleos más ligeros y liberar energía; esa misma energía es la que se debe añadir a los dos núcleos producidos para volver a formar uno de uranio El proceso contrario, *fusión* con liberación de energía, se da entre los núcleos ligeros, como el hidrógeno y el helio.

(3) Tales supernovas han ocurrido, en promedio, dos o tres veces por milenio; quizás con un poco de suerte, presenciemos una en nuestra época.

(4) Lucrecio, *De rerum natura,* II 999-1006; traducción de Rubén Bonifar Nuño.

X. ESTRUCTURA ACTUAL DEL UNIVERSO

GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

MILES de millones de años después de la Gran Explosión, el Universo adquirió la estructura que ahora presenta: galaxias, grupos y cúmulos de galaxias. Veamos con más detalle estos constituyentes del Universo en el presente capítulo.

Las galaxias son muy distintas entre sí, pero poseen algunas características que permiten clasificarlas esencialmente en cuatro categorías: espirales, elípticas, lenticulares e irregulares.

Como su nombre lo indica, las galaxias espirales son aquellas que presentan "brazos" espirales y semejan rehiletes. La mayoría de las galaxias son de este tipo, incluyendo la nuestra y su vecina Andrómeda (Figura 19). Se distingue en ellas una parte central muy brillante, en forma de esfera aplanada, de la que surgen los brazos característicos; las estrellas más brillantes de estas galaxias se localizan en una región con forma de disco, mientras que las estrellas poco luminosas y los cúmulos globulares forman un enorme halo esférico que envuelve al disco (Figura 44). Algunas galaxias espirales poseen una "barra" central (Figura 45).

En las galaxias elípticas, la parte central es, por lo general, más brillante (Figura 46). Estas galaxias casi no poseen gas ni polvo, a diferencia de las espirales, y las estrellas que las componen son relativamente viejas. El tamaño de las galaxias elípticas es muy variable, las más grandes pueden llegar a poseer hasta diez millones de millones de estrellas.

Figura 49. Porción del cúmulo de Virgo en la que pueden observarse algunas de sus galaxias.

Las galaxias lenticulares son de un tipo intermedio entre las galaxias espirales y las elípticas. Como estas últimas, poseen una región central abultada y un disco de estrellas brillantes, pero carecen de brazos; por otra parte, casi no poseen gas interestelar ni polvo (Figura 47).

Figura 50 Mapa del Universo, en el que cada punto blanco tiene un tamaño proporcional al número de galaxias en la región correspondiente (de un grado por grado). (Elaborado por M. Seldner, B.L. Siebers, E. J. Groth y P. J. E. Peebles, con datos del observatorio de Lick.).

Figura 51. El cuasar 3C 273 (a la izquierda). Nótese el chorro emitido. A la derecha se ve una estrella común.

Finalmente, existe un pequeño número de galaxias cuya forma es completamente irregular. Suelen estar constituidas de estrellas brillantes. Las nubes de Magallanes, satélites de nuestra galaxia, son de este tipo (Figura 48).

Hasta la fecha, no disponemos de una teoría enteramente satisfactoria que explique la morfología de las galaxias. ¿Son las espirales y las elípticas dos fases distintas de la evolución de una galaxia?, en cuyo caso, ¿cuál precede a cuál? ¿o tuvieron los dos tipos de galaxias orígenes distintos? Éstas son algunas de las incógnitas que la astrofísica trata de resolver.

Las galaxias tienden a agruparse, ya sea en grupos poco numerosos o en cúmulos de cientos o miles de galaxias. Nosotros vivimos en el llamado *Grupo Local*, que consta de nuestra galaxia, las nubes de Magallanes, la galaxia de Andrómeda y varias "galaxias enanas". Éste es un conjunto bastante modesto, sobre todo si se compara con el cúmulo de Virgo (Figura 49), relativamente cercano, a unos 30 millones de años luz, que contiene alrededor de mil galaxias de todos los tipos y tamaños. Estudiando la distribución de las galaxias, los astrónomos han logrado identificar cerca de 2 500 cúmulos de galaxias en todo el Universo accesible a las observaciones astrónomicas.

¿Existen, a su vez, "*supercúmulos*" de galaxias: cúmulos de cúmulos? Ésta es una pregunta muy interesante que sólo en los últimos años se ha intentado contestar. El problema se asemeja al de descubrir la estructura de un bosque sin salir de él; lo único que se puede hacer es medir cuidadosamente la posición de cada árbol, y construir un mapa del bosque que revele su forma. Lo mismo se puede hacer con los cúmulos galácticos, cuyas distancias se han podido determinar con suficiente precisión (utilizando la ley de Hubble, que relaciona la velocidad de recesión, medida por el desplazamiento de las líneas espectrales, con la distancia). Según los resultados más recientes de este tipo de estudios, los cúmulos de galaxias parecen agruparse en *supercúmulos,* que tienen formas de filamentos y miden cientos de millones de años luz. Entre los filamentos, se localizan enormes huecos en los que no se encuentra ni una sola galaxia; por ejemplo, se ha localizado un hueco en dirección de la constelación del Boyero que mide unos 250 millones de años luz de diámetro. Por lo que respecta al Grupo Local, en el que vivimos, podría ser una pequeña componente de un supercúmulo que mide más de 70 millones de años luz y que comprende, entre otros, el gigantesco cúmulo de Virgo.

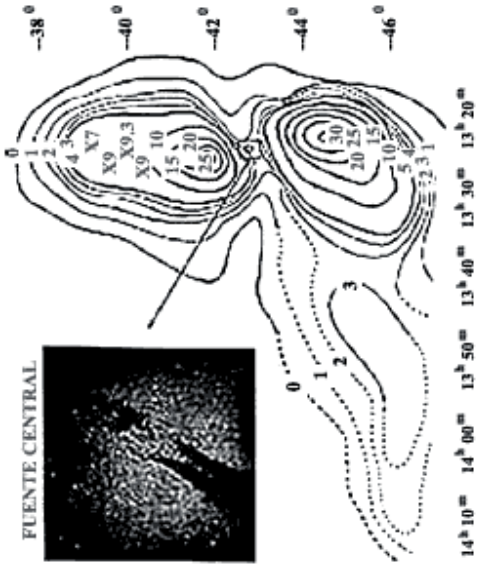

Figura 52. Mapa en radio de la radiogalaxia Centauro A junto con la fotografía, a escala más grande, de su galaxia central. La emisión en radio proviene de los dos grandes lóbulos.

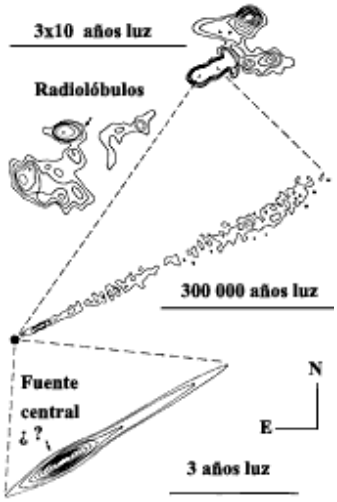

Figura 53. Imagen de la galaxia NCG 6251, en 3 escalas distintas, construida a partir de observaciones radioastronómicas. Se ve el nacimiento de uno de los dos chorros que originan los lóbulos de una radiogalaxia. (Adaptado de Readhed, Cohen y Blandford, *Nature 272*, 1972.)

Figura 54. Galaxia M87.

Si pudiéramos tener una visión a gran escala del Universo, veríamos una estructura filamentaria que recuerda un encaje (Figura 50). Algunos astrofísicos piensan que, originalmente, los cúmulos galácticos estaban distribuidos al azar, pero, debido a sus mutuas atracciones gravitacionales, con el tiempo llegaron a agruparse en filamentos unidos gravitacionalmente. Se ha intentado reproducir por medio de computadoras la evolución de un conjunto muy grande de puntos, interactuando entre sí gravitacionalmente y distribuidos inicialmente al azar; después de cierto tiempo, los puntos tienden a agruparse en estructuras que recuerdan los supercúmulos galácticos; aunque, por supuesto, los cálculos se refieren a situaciones idealizadas y muy simplificadas con respecto al Universo real.

La otra posibilidad es que se hayan formado inicialmente distribuciones filamentarias de gas, que posteriormente se colapsaron gravitacionalmente, fragmentándose y dando origen a los cúmulos galácticos. Por ahora, todavía no podemos afirmar si los cúmulos precedieron a los supercúmulos o viceversa.

LOS CUASARES

La luz que perciben nuestros ojos ocupa un rango muy estrecho en et espectro electromagnético (véase la figura 3) y no todos los cuerpos cósmicos emiten la mayor parte de su radiación en forma de luz visible. Con el estudio de las ondas de radio, que empezó a desarrollarse después de la segunda Guerra Mundial, se abrieron nuevas ventanas para la astronomía. Los radioastrónomos empezaron a localizar fuentes muy potentes de radio en el cielo que no siempre correspondían a algún objeto visible particularmente conspicuo. El caso de los *cuasares* es un ejemplo ilustrativo.

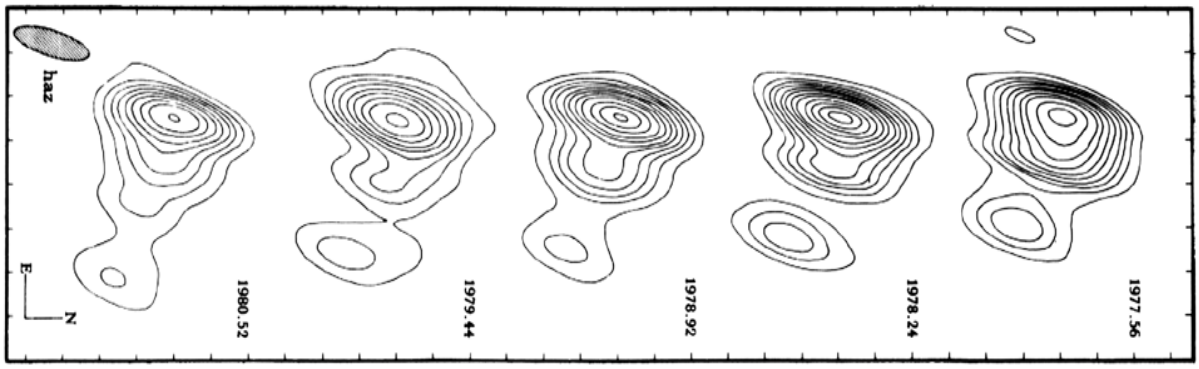

Figura 55. Imágenes del Núcleo del cuasar 3C 273 construidas a partir de observaciones radioastronómicas. Nótese la eyección de materia. (De Pearson et al., Nature 290, 1981.)

3C 273 era una fuente de radio (1) bastante potente cuya posición exacta se logró determinar en 1962: en luz visible, resultó ser una modestísima "estrella" azul (de magnitud 13) que hasta entonces había pasado inadvertida; la única particularidad que mostraba esa supuesta estrella en las fotografías era una emisión de gas en forma de chorro (Figura 51). Pero el espectro de 3C 273 fue una sorpresa, pues ninguna línea espectral parecía corresponder a nada conocido. Finalmente, en 1963, el astrónomo Maarten Schmidt resolvió el problema al descubrir que las líneas espectrales de 3C 273 eran las del hidrógeno, pero notablemente corridas hacia al rojo. Si este corrimiento se debía al efecto Doppler, entonces 3C 273 se estaría alejando de nosotros a la velocidad de 50 000 kilómetros por segundo: ¡un sexto de la velocidad de la luz! Y si esa velocidad de recesión se debía a la expansión del Universo, 3C 273 se encontraría, según la ley de Hubble, a la distancia de dos mil millones de años luz; nunca antes se había observado un objeto tan lejano.

Posteriormente, se descubrieron muchos más cuasares —se conocen ya más de 2 000— de los cuales 3C 273 resultó ser el más cercano. El nombre cuasar es una abreviación del inglés *quasi-stellar object*: objeto casi estelar. Los más lejanos detectados hasta ahora tienen velocidades de recesión cercanas a la velocidad de la luz, lo cual los sitúa muy cerca del horizonte cósmico. (2) En las placas fotográficas, todos los cuasares aparecen como débiles estrellas azules. Emiten intensamente en el infrarrojo y el ultravioleta; algunos también en longitudes de onda de radio, y otros son poderosas fuentes de rayos X. Si nuestros ojos fueran sensibles a esas longitudes de onda extremas, los cuasares nos serían objetos tan comunes como las estrellas.

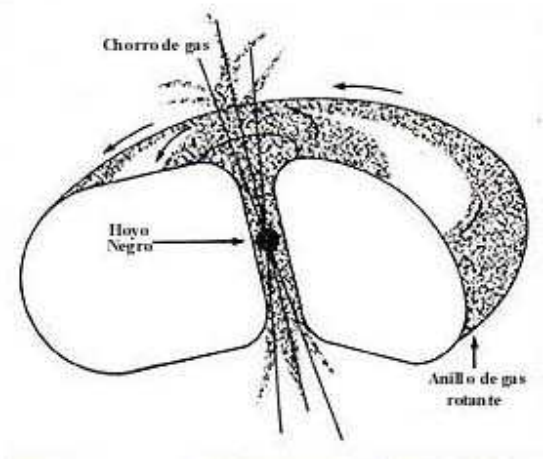

Figura 56. Posible mecanismo para producir chorros: un disco grueso forma dos remolinos y la presión de la radiación cerca del agujero negro empuja el material que no penetra al agujero a lo largo de los remolinos.

Lo sorprendente de los cuasares no es tanto su lejanía sino el hecho de que puedan ser visibles. Un cuasar deber ser intrínsecamente tan brillante (en luz visible) como 1 000 galaxias juntas para que pueda aparecer como una débil estrella, si realmente se encuentra a varios miles de millones de años luz. Y los cuasares que son radioemisores deben ser millones de veces más potentes que la Vía Láctea en su conjunto. Pero aún más sorprendente es el hecho de que esa enorme energía proviene de una región cuyo tamaño no excede un año luz —menos de una cienmilésima parte del tamaño de una galaxia normal—. En efecto, el brillo de los cuasares oscila con periodos típicamente de meses. Para que un objeto coordine todas sus partes en unos cuantos meses, su tamaño debe ser menor que la distancia a que viaja la luz en ese tiempo, pues ninguna señal es más rápida que la luminosa.

Al principio, los astrónomos no veían ninguna relación entre los cuasares y las galaxias, pero la brecha entre estos dos tipos de objetos cósmicos se ha ido llenando poco a poco al descubrirse galaxias cuyos *núcleos* presentan semejanzas con los cuasares. Hoy en día, se piensa que los cuasares son los núcleos de galaxias muy jóvenes, y que la actividad en el núcleo de una galaxia disminuye con el tiempo, aunque no desaparece del todo, como veremos a continuación.

LAS RADIOGALAXIAS

Otro de los descubrimientos de la radioastronomía fue la existencia de las llamadas radiogalaxias. Éstas son gigantescas distribuciones de gas ionizado, asociadas a una galaxia visible, y que son potentes emisores radio. El prototipo de estos objetos es Centauro A, la radiogalaxia más cercana. Veamos sus características.

Centauro A está asociado a una galaxia elíptica; en las fotografías, esta galaxia se ve rodeada de un anillo de polvo (Figura 52), lo cual es, de por sí, bastante intrigante, pues las galaxias elípticas no suelen contener polvo o gas. La emisión de radio proviene de dos gigantescos lóbulos situados simétricamente de cada lado de la galaxia visible; cada uno mide 2 1/2 millones de años luz, casi veinte veces el diámetro de la galaxia elíptica.

Los lóbulos están constituidos de *plasma*: gas ionizado con un campo magnético. En un plasma, los electrones que se han desligado de los átomos se mueven girando a lo largo de las líneas del campo magnético y emiten radiación en prácticamente todas las longitudes de onda, pero muy particularmente ondas de radio e infrarrojas. Este proceso se llama *emisión sincrotrónica* cuando la velocidad de los electrones es cercana a la de la luz —como es el caso de Centauro A.

El plasma de los lóbulos es eyectado de una pequeñísima región en el núcleo de la galaxia visible (Figura 53). El brillo de esa región varía en unos cuantos meses, por lo que su tamaño no puede exceder de una décima parte de un año luz. Más aún, emite rayos X con una variación de días, lo cual indica que el núcleo posee una parte central que se encuentra a varios millones de grados y cuyo tamaño es comparable al del Sistema Solar. Así, tenemos el fenómeno notable de que, de un lugar extremadamente pequeño en comparación con la galaxia, fluye la materia en dos direcciones bien definidas llegando a abarcar una extensión de 2 1/2 millones de años luz (distancia comparable a la que hay entre la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda). El mismo comportamiento se observa en todas las otras radiogalaxias conocidas: pares de gigantescos lóbulos de plasma emergen de una diminuta región en el núcleo de una galaxia visible. ¿Cuál es la naturaleza de esa misteriosa "máquina central" en el núcleo de las galaxias? Ésta es quizás la pregunta más importante de la astrofísica moderna, que podría dar la clave del origen de las galaxias y de muchos otros fenómenos cósmicos. Por ahora, es un problema abierto a la investigación (mencionaremos más adelante una posible, explicación).

EL NÚCLEO DE LAS GALAXIAS

En los años cuarentas, el astrónomo Seyfert descubrió un tipo de galaxias espirales cuyos núcleos son excepcionalmente brillantes; el análisis espectroscópico reveló la presencia, en el centro de ellas, de gas ionizado extremadamente caliente y animado de velocidades muy altas. Lo más interesante es que el espectro del núcleo de estas galaxias tiene la misma apariencia que el de los cuasares, excepto por el brillo intrínseco menos intenso y un corrimiento al rojo mucho menor. Tal parece que las galaxias de Seyfert son el eslabón entre los cuasares y las galaxias espirales "normales".

Pero aun las galaxias "normales" parecen poseer algún objeto misterioso en sus centros. En los últimos años, se ha detectado indirectamente la presencia de objetos muy masivos y compactos en los núcleos de algunas galaxias. Por ejemplo, las estrellas en la parte central de la galaxia M87 (Figura 54) se encuentran sumamente concentradas y giran alrededor del centro galáctico a muy altas velocidades; esto es posible sólo si existe en el núcleo un cuerpo muy compacto y con una masa equivalente a unos 5 000 millones de soles que mantenga unidas gravitacionalmente a estas estrellas. Como veremos más adelante, podría tratarse de un gigantesco agujero negro.

Incluso nuestra propia galaxia muestra cierta extraña actividad en su centro. Las observaciones más recientes en luz infrarroja y en radio han revelado la presencia de gas emitido a grandes velocidades desde una región, central sumamente compacta. Además, el movimiento de las estrellas cerca del centro galáctico también parece indicar la presencia de un objeto compacto con una masa de varios millones de soles.

Con base en las observaciones modernas no cabe duda de que fenómenos aún inexplicables suceden en los núcleos galácticos. En algunas galaxias, la actividad es muy notoria, mientras que en otras no se manifiesta directamente. Muchos astrónomos están convencidos de que los cuasares son los núcleos de galaxias en proceso de formación; en efecto, se ha detectado la presencia de nebulosidades alrededor de ellos, mucho menos brillantes que el cuasar mismo, pero asociadas a éste. En cuanto a las galaxias de Seyfert, podrían ser cuasares más evolucionados que ya han tomado la forma de galaxias. Finalmente, y dentro de este esquema evolutivo, la actividad nuclear en una galaxia se apagaría con el tiempo y quedaría una galaxia "normal" como la nuestra. La "máquina central" permanecerá oculta en la región central de la galaxia, donde la densidad de estrellas es muy alta.

También existe un vínculo entre las radiogalaxias y los cuasares: el espectro de la galaxia central suele ser muy parecido al de ciertos cuasares. Otra característica en común es la eyección, desde una región central muy pequeña, de un chorro de plasma sumamente energético. En el caso de las radiogalaxias, este chorro es doble, mientras que los cuasares sólo exhiben uno, sin ningún lóbulo radioemisor. Ese chorro de materia podría ser una clave para entender qué sucede en los núcleos galácticos y en los cuasares.

En la Figura 51 se ve claramente el chorro emitido por el cuasar 3C 273; quizás tiene una contraparte del otro lado del cuasar que no vemos por ser menos intensa. De hecho, el plasma emitido hacia nosotros radia luz que, por el efecto Doppler, nos llega corrida hacia el azul (o sea más energética) mientras que si hay plasma emitido en sentido contrario se vería más débil, o no se vería, por emitir luz que recibimos corrida al rojo.

Otro ejemplo, notable por su relativa cercanía, es la galaxia gigante M87, que ya mencionamos anteriormente y que se ve en la figura 54 con su correspondiente

chorro de unos 5 000 años luz de longitud. La galaxia y su chorro emiten ondas de radio y rayos X. M87 se encuentra a uños 50 millones de años luz, pero si estuviera más lejos, la veríamos como un cuasar bastante típico.

Los radioastrónomos han desarrollado una técnica de observación radioastronómica que consiste en conectar entre sí varios radiotelescopios y utilizar un principio llamado interferometría para producir imágenes muy precisas de cuerpos celestes radioemisores. Esta técnica permite "ver" en ondas de radio lo que los telescopios normales no pueden discernir. En la Figura 55 se ve una serie de imágenes en radio del núcleo del cuasar 3C 147 tomadas a intervalos de algunos meses en los que se advierte claramente un chorro de plasma eyectado desde una pequeña región. Según estas imágenes, el chorro aumentó 25 años luz su tamaño en sólo tres años, ¡lo cual implica una velocidad ocho veces superior a la de la luz!. Aparentemente, esto viola el principio de que nada puede moverse más rápidamente que la luz. Sin embargo, se puede explicar esta velocidad "superluminosa" si el chorro está dirigido casi hacia nosotros y se mueve a una velocidad muy cercana —¡pero inferior!— a la luminosa: la luz emitida por la parte delantera del chorro nos llega antes que la emitida *simultáneamente* por la parte trasera, la cual se ve rezagada; el efecto neto es una aparente expansión más rápida que la luz.

Como el caso de 3C 273 no es el único que se ha encontrado en que se ve una expansión "superluminosa", los astrónomos sospechan que los chorros sólo son visibles si son emitidos casi exactamente hacia nosotros; como señalamos más arriba, el efecto Doppler produce un aumento de la energía radiada por el plasma y recibida en la Tierra.

¿AGUJEROS NEGROS EN LOS NÚCLEOS GALÁCTICOS?

Un gigantesco *agujero negro* que succione la materia a su alrededor podría causar, en principio, algunos de los fenómenos que se observan en el centro de las galaxias. Ésta es la explicación más popular en la actualidad. Hay que señalar, sin embargo, que aún faltan muchas observaciones y estudios teóricos para confirmar esta hipótesis.

Un agujero negro es una concentración de masa cuyo campo gravitacional es tan intenso que no deja escapar la luz. La teoría de la Relatividad General predice la existencia de tales objetos y los interpreta como regiones del espacio-tiempo extremadamente curvadas. La materia puede penetrar a un agujero negro, pero nunca salir de él. Muchos astrónomos aceptan la idea de que las estrellas muy masivas terminan su evolución volviéndose agujeros negros (después de haberse desembarazado de parte de su masa por una explosión de supernova). También podrían existir agujeros negros gigantescos, de varios miles de millones de veces la masa del Sol, en los núcleos de las galaxias, aunque el origen de ellos es más incierto.

Un agujero negro aislado en el espacio sólo puede detectarse por su atracción gravitacional, pero si se encuentra rodeado de materia es capaz de calentar por fricción el material que cae en él. Un agujero negro gigantesco que se encuentre en el centro de una galaxia formará a su alrededor un enorme disco de gas, proveniente de las estrellas cercanas o del material interestelar. A medida que este material se acerca al agujero, se calienta por su fricción interna y libera enormes cantidades de energía en forma de radiación. (3) Se ha sugerido, incluso, que se forman de cada lado del agujero dos remolinos paralelos al eje de rotación del gas; estos remolinos pueden funcionar como cañones por donde se arroja la materia que no llega a penetrar al agujero y producir, así, los misteriosos chorros de plasma que se observan en los cuasares y las radiogalaxias (Figura 56).

¿Cuál es el origen de los hoyos negros gigantescos? Se ha especulado que en los primeros instantes del Universo se pudieron formar agujeros negros con masas muy variables, como resultado del colapso gravitacional de las inhomogeneidades o "grumos" que describimos en el capítulo anterior. Una vez formados, esos agujeros negros primordiales atrajeron gravitacionalmente a la materia a su alrededor; parte de esta materia fue absorbida por el agujero, aumentando su masa, y otra parte se quedó girando alrededor del agujero sin caer en él, formando una enorme nube de gas que, finalmente, se transformó en una galaxia. Lo atractivo de esta hipótesis es que explica en forma natural por qué deben encontrarse agujeros negros en el núcleo de las galaxias.

NOTAS

(1) La nomenclatura significa que esa fuente aparece con el número 273 en el Tercer Catélogo de Cambridge de radiofuentes.

(2) Es importante notar que la ley de Hubble tal como se da en la página 69 es válida sólo para velocidades pequeñas con respecto a la de la luz. Para objetos tan distantes como los cuasares, se deben de tomar en cuenta correcciones relativistas y cosmológicas.

(3) Tal fenómeno puede suceder también en un sistema estelar doble, en el que una estrella se ha vuelto agujero negro y succiona el gas de su compañera. Antes de penetrar el agujero, el gas alcanza temperaturas de varios millones de grados y emite en rayos X. Se cree que la fuente de rayos X llamada *Cygnus X-1* es un ejemplo de este mecanismo.

XI. EPÍLOGO: EL FUTURO DE LAS COSMOLOGÍA

NUESTRA comprensión del Universo dio un salto cuantitativo y cualitativo a principios del siglo XX gracias a la conjunción de dos importantes factores: la revolución científica producida por el surgimiento de la relatividad y la mecánica cuántica, y una visión más amplia del Universo a través de los grandes telescopios que se construyeron en esa época. Es posible que presenciemos otro espectacular avance de la cosmología en los finales del siglo XX —si la humanidad no se ha destruido para entonces—. Por una parte, la física ha progresado considerablemente en los últimos años, y en particular la física del mundo subatómico; y si bien aún falta mucho por comprender, ya no parece un sueño irrealizable una teoría unificada de las fuerzas de la naturaleza, en el espíritu buscado por Einstein, o por los menos una mejor comprensión del origen cuántico de la gravitación. Por otra parte, las observaciones astronómicas han avanzado espectacularmente en los años recientes, gracias al desarrollo de sistemas electrónicos para detectar y analizar fuentes muy débiles de luz, al uso de satélites artificiales, y a las nuevas técnicas radioastronómicas; además, está programada para el futuro cercano la construcción de gigantescos telescopios, aún mayores que los ya existentes.

Todo progreso científico ha sido estimulado por el descubrimiento de nuevos fenómenos naturales. En el campo de la cosmología, los avances de la astronomía observacional apenas empiezan a rendir frutos. Con las observaciones en longitudes de onda hasta ahora inaccesibles, tendremos una visión mucho más precisa de los fenómenos cósmicos y la posibilidad de desarrollar y confirmar nuestras teorías.

La actividad en el núcleo de un cuasar o una galaxia activa es seguramente uno de los fenómenos más interesantes a los que los astrónomos y astrofísicos tendrán que enfrentarse. Quizás sea necesario reconsiderar las leyes de la física tal como las conocemos, o quizás nuestras teorías, llevadas hasta límites extremos de validez, sean suficientes para explicar lo que ocurre en un núcleo galáctico.

El origen de las galaxias y, en general, de la estructura a gran escala del Universo es otro problema pendiente de resolverse en forma clara e integral. ¿Realmente se forman las galaxias por la condensación de materia difusa, o es su origen más violento y debe buscarse en los primeros millonésimos de segundo después de la Gran Explosión?

Otro de los aspectos más interesantes de la cosmología moderna es su interacción con la física de partículas elementales, una rama de la física que parece ser, a primera vista, diametralmente alejada de la cosmología, pues las dos disciplinas estudian dos extremos opuestos de la escala del mundo. Y sin embargo, empieza a surgir la posibilidad de entender los inicios del Universo

gracias a la física del micromundo, e, inversamente, de probar las teorías de partículas elementales por las implicaciones cosmólogicas que tendrían. De hecho, algunos aspectos de las teorías modernas del mundo subatómico sólo podrán confirmarse a través de la cosmología, pues no se dispone en la Tierra de las energías para realizar los experimentos necesarios.

Podemos afirmar ahora que la astronomía y la cosmología han cesado de ser ciencias contemplativas —cuyas existencias parecían justificarse sólo por motivos estéticos—, para pasar a ocupar un lugar fundamental entre las ciencias de la naturaleza.

BIBLIOGRAFÍA

La siguiente no pretende ser una bibliografía exhaustiva. Citaré sólo algunos libros de divulgación sobre cosmología y temas relacionados.

ASPECTOS HISTÓRICOS DE LA COSMOLOGÍA

(De los griegos a Newton:)

A. Koyré, *Del mundo cerrado al Universo infinito*, Siglo XXI (México, 1982).

A. Koestler, *Los sonámbulos*, CONACYT (México, 1981).

HISTORIA DE LA COSMOLOGÍA HASTA LOS TIEMPOS MODERNOS

(En inglés:)

M. K. Munitz (comp.), *Theories of the Universe*, The Free Press (Glencoe, Illinois, 1957).

R.Berendzen, R. Hart y D. Seeley, *Man Discovers the Galaxies*, Science History Publications (Nueva York, 1976).

SOBRE RELATIVIDAD Y COSMOLOGÍA

P. C. W. Davies, *El espacio y el tiempo en el Universo contemporáneo*, Fondo de Cultura Económica (México, 1982).

R. M. Wald, *Espacio, tiempo y gravitación*, Fondo de Cultura Económica (México, 1982).

W. J. Kaufmann, *Relatividad y cosmología*, Editorial Harla (México, 1982).

SOBRE ASTRONOMÍA Y COSMOLOGÍA

L. F. Rodríguez (comp.), *La astronomía contemporánea*, UNAM (México, 1985).

L. F. Rodríguez, *Un Universo en expansión*, Fondo de Cultura Económica (México, 1986).

H. L. Shipman, *Los agujeros negros, los cuasares y el Universo*, Editorial Alhambra (Madrid, 1982).

I. Asimov, *El Universo*, Alianza Editorial (Madrid, 1983).

Sobre la teoría de la Gran Explosión se han publicado muchos libros, pero se han vuelto paulatinamente obsoletos con el paso del tiempo. Citaré los dos más reciente (en inglés):

J. Barrow y J. Silk, *The Left-Hand of Creation*, Basic Books (Nueva York, 1983).

J. S. Trefil, *The Moment of Creation*, Macmillan (Nueva York, 1983).

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de diciembre de 1996 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F.

Se tiraron 3 000 ejemplares.

La ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS

CONTRAPORTADA

Shahem Hacyan (1947), científico mexicano de ascendencia armenia, realizó estudios de física hasta el nivel licenciatura en la UNAM. Más tarde se doctoró en física teórica en la Universidad de Sussex, Inglaterra. Desde 1973 es investigador de tiempo completo del Instituto de Astronomía de la UNAM. Cuenta en su curriculum con 28 trabajos publicados, especialmente sobre astrofísica teórica. Dedicado y serio en su trabajo, gusta también de escuchar buena música y su poeta favorito es Rimbaud.

Hacyan inicia El descubrimiento del Universo haciéndose las preguntas clásicas y plenas de angustia: ¿qué es el Universo?, ¿ tuvo principio y tendrá fin?, ¿ cuáles son sus fronteras y qué hay más allá de ellas? El hombre quiere, necesita comprender, aunque la respuesta final nunca le llegue: a una incógnita se engranan miles más y el conocimiento se convierte en una serie infinita, cada vez más atrayente y complicada; cada vez más cercana y más lejana. Paradójicamente, mientras más se sabe más se ignora.

A lo largo de su libro Hacyan va mostrando con prosa clara, y en la forma " más sencilla posible dentro de la complejidad del tema, lo que se sabe sobre el Universo. Va presentando ordenadamente mitos, historias, hechos comprobados y dudas fundamentales. El desafío considerable que representa el conocer persiste en la mente del hombre y la provocación intelectual se proyecta como símbolo inequívoco de la naturaleza infinita de la ciencia. Hacyan nos conduce por este camino.

"Reservado y relativamente silencioso —dice de Hacyan el doctor Guillermo Haro— sólo habla cuando tiene algo importante que decir. Su actitud de astrofísico teórico tiene un acento suave y me atrevería a decir que lleva siempre un mensaje seriamente poético."